



Paulo Filipe Garcia Teixeira

Licenciado em Ciências da Engenharia

Contributo para a aplicação do conceito BIM em Manutenção Industrial: uma abordagem a um caso empresarial

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Tiago Alexandre Narciso da Silva,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e
Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Engenheiro Tiago Albarran, Chefe de Departamento
de Manutenção, SGL Composites, S.A.

Júri

Presidente: Doutor António José Freire Mourão, Professor
Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade NOVA de Lisboa.

Vogais: Doutor José Augusto da Silva Sobral, Professor
Adjunto do Instituto Politécnico de
Lisboa/Instituto Superior de Engenharia de Lisboa;
Engenheiro Tiago Albarran, Chefe de
Departamento de Manutenção da SGL
Composites, S.A.

Setembro de 2019



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Contributo para a aplicação do conceito BIM em Manutenção Industrial: uma abordagem a um caso empresarial.

Copyright © Paulo Filipe Garcia Teixeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Whether you want it or not, it is irrelevant, you will never know until you achieve it. Divorce the story of your limitation and marry the truth of your unlimited capacity, then the entire game changes.

Agradecimentos

Esta dissertação representa o final de uma das etapas mais importantes da minha vida. Uma etapa onde cresci e aprendi muito ao ultrapassar todos os desafios a que me propus, e isto só foi possível com a ajuda e o incentivo de algumas pessoas. Posto isto, expresso aqui o meu profundo e sincero agradecimento.

Começo por agradecer ao meu orientador da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, o Professor Doutor Tiago Silva. Agradeço por toda a disponibilidade e acompanhamento durante a realização desta dissertação, contribuindo assim para enriquecer o meu conhecimento.

Aos meus coorientadores, o Engenheiro Tiago Albarran e o Engenheiro João Costa, por toda a disponibilidade para qualquer tipo de dúvida, sabedoria transmitida, tanto profissional como pessoal, e pela oportunidade de realizar esta dissertação na empresa.

À SGL Composites, S.A., pela rápida integração e por me ter acolhido durante os seis meses de estágio curricular, em especial ao Departamento de Manutenção.

Aos meus pais, irmão e madrinha por todo o apoio incondicional, motivação, preocupação, disponibilidade e incentivo que me deram durante todo este percurso académico.

À Carolina, um obrigado por tudo.

Resumo

Com a presente Revolução Industrial, conhecida como a Indústria 4.0, tendo como princípios a interoperabilidade, a virtualização, a descentralização, a orientação para os serviços e a modularidade, surge a ideia de implementar novos processos de gestão e exigentes metodologias de concessão e de construção digital, como o *Building Information Modelling* (BIM) na área da Manutenção Industrial. Trata-se de uma área com um peso considerável em qualquer setor industrial, tendo como foco o aumento da qualidade e da fiabilidade do processo produtivo e do produto final. Tendo como objetivo determinar o funcionamento global de uma linha de produção de fibra têxtil sintética através da análise da condição dos equipamentos presentes na mesma, surgiu a necessidade de integrar a manutenção através da digitalização da sua informação. Para isto, procedeu-se à definição e estudo das diversas famílias de equipamentos e determinou-se quais os parâmetros de funcionamento de algumas destas famílias de equipamentos alvo de monitorização. Também se procedeu à implementação da arquitetura de um sistema ciberfísico para sistemas de produção, no âmbito da Indústria 4.0, no contexto da fábrica, permitindo estruturar o fluxo de informação, desde o controlo da condição dos equipamentos até ao estado global da fábrica sugerindo um *layout* a ser utilizado num *software* de *dashboarding* onde se combinam dados provenientes de diversas fontes de qualquer setor, oferecendo um conjunto de possibilidades de visualização que visam apoiar o processo de decisão.

O estudo realizado permitirá à empresa parceira dispor de informação que será útil quando, no futuro, implementar metodologias que permitem efetuar a análise da condição dos equipamentos através da monitorização contínua dos parâmetros de funcionamento dos mesmos, apoiando a gestão da manutenção, aumentando a fiabilidade, e permitindo gerir os equipamentos e a organização de uma forma mais informada.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Digitalização da Informação; Manutenção Industrial; Manutenção Preventiva Condicionada; Controlo da Condição

Abstract

Nowadays, we are in the middle of an Industrial Revolution, known as Industry 4.0, based on the principles of interoperability, virtualization, decentralization, service and modularity oriented. The idea of implementing new management processes in the field of Industrial Maintenance, regarding demanding concession and digital construction methodologies, such as the Building Information Modelling (BIM), is developing. This is an issue with considerable importance in any industrial sector, allowing to improve the production process and the final product quality and reliability. With the objective of determining the global condition of a synthetic textile fiber production line by analyzing the condition of the various equipment in it, the need arose to integrate maintenance by digitizing its information. Then, we proceeded with the definition and study of the several equipment families and we determined which operations parameters to be monitored. The architecture of a cyberphysical system for production systems within Industry 4.0 was also implemented within the factory context, allowing to structure the information flow, from the condition-based monitoring to the overall state of the factory, by suggesting a layout to be used in a dashboarding software, where data from different sources in any industry is combined, suggesting a set of visualization possibilities to support the decision process.

This study will allow the company to have the information needed when, in the future, they decide to implement methodologies that allow to analyze the equipment status through the continuous monitoring of its operating parameters, helping maintenance management by increasing reliability and allowing to manage the equipment and the company in an informed way.

Keywords: Industry 4.0; Information Digitization; Industrial Maintenance; Condition-based Preventive Maintenance; Condition Control

Índice Geral

| | |
|--|-------------|
| Agradecimentos | vii |
| Resumo | ix |
| Abstract | xi |
| Índice Geral..... | xiii |
| Índice de Tabelas | xv |
| Índice de Figuras | xvii |
| Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos | xix |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 2 |
| 1.3 Estrutura da dissertação | 3 |
| 2 Enquadramento | 5 |
| 2.1 Introdução | 5 |
| 2.2 A Quarta Revolução Industrial: Indústria 4.0..... | 5 |
| 2.3 Building Information Modelling - BIM..... | 6 |
| 2.4 Manutenção Industrial | 10 |
| 2.5 Controlo de Condição | 17 |
| 3 A Empresa – SGL Composites, S.A. | 21 |
| 3.1 Caracterização da Empresa..... | 21 |
| 3.2 Produtos | 22 |
| 3.3 A Fábrica | 23 |
| 4 A Evolução da SGL Composites S.A. para o paradigma da Indústria 4.0..... | 29 |
| 4.1 As inovações que a implementação de sistemas ciberfísicos trouxeram para a gestão da manutenção | 29 |
| 4.2 Arquitetura de Sistemas Ciberfísicos para Sistemas de Produção baseados na Indústria 4.0 | 30 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | Aplicação da Arquitetura de Sistemas Ciberfísicos para Sistemas de Produção baseados na Indústria 4.0 na SGL Composites, S.A..... | 32 |
| 5 | Famílias de Equipamentos e Parâmetros de Monitorização | 39 |
| 5.1 | Bomba Centrífuga..... | 40 |
| 5.2 | Motor Elétrico..... | 46 |
| 5.3 | Bomba de Carretos | 50 |
| 5.4 | Permutador de Calor | 52 |
| 6 | Conclusão..... | 57 |
| | Referências | 61 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Tipos de falhas por componente da bomba centrífuga [13] | 46 |
| Tabela 2 - Tipos de falhas por componente da bomba de carretos [13] | 52 |
| Tabela 3 - Tipos de falhas por componente do permutador tubular [13]. | 56 |
| Tabela 4 - Tipos de falhas por componente do permutador de placas [13]. | 56 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma da Estrutura da Dissertação | 3 |
| Figura 2 - Vetores do BIM | 7 |
| Figura 3 - BIM 3D a 7D, adaptado de [6] | 8 |
| Figura 4 - Tipos de Manutenção, adaptado de [9] | 11 |
| Figura 5 - Sequência de processo da produção de fibra | 25 |
| Figura 6 - Fluxo do processo de produção da SGL Composites, S.A., adaptado de [13] | 27 |
| Figura 7 - Estrutura do Fluxo de Informação da SGL Composites, S.A. | 33 |
| Figura 8 - Estruturação da Informação do SP..... | 34 |
| Figura 9 - Aplicação da arquitetura de CPS na SGL Composites, S.A. | 35 |
| Figura 10 - Sugestão de <i>layout</i> para dispor a informação através de um <i>software</i> de <i>dashboarding</i> | 36 |
| Figura 11 - <i>Dashboard</i> de uma bomba centrífuga..... | 37 |
| Figura 12 - Componentes gerais de uma bomba centrífuga, adaptado de [24] | 41 |
| Figura 13 - Tipos de Motores Elétricos | 47 |
| Figura 14 - Constituição do motor de indução trifásico, adaptado de [18] | 48 |
| Figura 15 - Constituição de um Permutador Tubular, adaptado de [33] | 53 |
| Figura 16 - Constituição de um Permutador de Placas, adaptado de [34] | 54 |

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

| | |
|-------|--|
| AEC | Arquitetura, Engenharia e Construção |
| IAI | <i>International Alliance for Interoperability</i> |
| APA | Armazém de Produtos Acabados |
| APR | Armazém de Peças de Reserva |
| BEP | Ponto de Melhor Eficiência (BEP – <i>Best Efficiency Point</i>) |
| BIM | <i>Building Information Modelling</i> |
| CA | Corrente Alternada |
| CB | Corte e Embalagem (CB – <i>Cut & Baling</i>) |
| CBM | Manutenção Baseada na Condição (CBM - <i>Condition-based Maintenance</i>) |
| CC | Corrente Contínua |
| CP | Polimerização Contínua (CP – <i>Continuous Polymerization</i>) |
| CPS | Sistema Ciberfísico (CPS – <i>Cyber Physical System</i>) |
| DP | Preparação de Xarope (DP – <i>Dope Preparation</i>) |
| FMEA | Análises dos modos e efeitos de falhas (FMEA - <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>) |
| FMECA | Análise dos modos, efeitos e criticidade de falhas (FMECA - |

| | |
|------|--|
| | <i>Failure Mode Effects and Criticality Analysis)</i> |
| FTA | Análise da árvore de falhas (<i>FTA - Fault Tree Analysis</i>) |
| IA | Inteligência Artificial |
| IFC | <i>Industry Foundation Class</i> |
| IoT | Internet das Coisas (<i>IoT - Internet of Things</i>) |
| IP | Instalação Piloto |
| KPI | <i>Key Performance Indicator</i> |
| LAB | Laboratório |
| MEI | Manutenção Elétrica e Instrumentação |
| MM | Manutenção Mecânica |
| NPSH | <i>Net Positive Suction Head</i> |
| PPA | Produção de Produtos Acabados |
| PPI | Preparação de Produtos Intermédios |
| PS | Parque de Silos |
| RCM | Manutenção Centrada na Fiabilidade (<i>RCM – Reliability Centered Maintenance</i>) |
| SOAP | Programa de Análise Espectrométrica de Lubrificantes (<i>SOAP – Spectrographic Oil Analysis Program</i>) |
| SP | Extrusão (<i>SP – Spinning</i>) |
| SR | Área de Recuperação de Solvente |
| SU | Solvente e Utilidades |
| TF | Parque de Tanques |
| TICs | Tecnologias de Informação e Comunicação |
| TT | Conversão de Cabo (<i>TT – Tow-to-top</i>) |
| UT | Área de Utilidades |

1 Introdução

1.1 Motivação

Atualmente, com o aumento da competitividade na indústria, associado à evolução tecnológica e à crescente exigência do consumidor, os processos produtivos são cada vez mais complexos e diversificados [1]. Isto leva a que se efetue uma gestão da manutenção na indústria de modo a que as falhas no processo de produção sejam identificadas tão precocemente quanto possível minimizando o seu impacto, reduzindo assim os custos associados a estas.

A manutenção e a sua gestão assumem, cada vez mais, um papel vital no processo produtivo de uma empresa, garantindo a sua fiabilidade e disponibilidade. A manutenção permite que isto ocorra através da implementação de processos que são capazes de detetar avarias atempadamente, de modo a que se proceda a uma intervenção de manutenção planeada reduzindo os custos e o tempo, ambos associados a uma paragem não programada, por vezes catastrófica.

Na área da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), pelos mesmos fatores referidos anteriormente, observou-se uma mudança no paradigma desta indústria do ponto de vista da gestão do projeto e da manutenção do edificado. Com esta mudança, patrocinada pelos níveis de exigência crescentes por parte das empresas de construção com o objetivo de reduzir prazos e custos, respeitar as normas e leis e por depender da situação económica das organizações, houve a necessidade de implementar uma metodologia que adote as novas tecnologias de informação e comunicação (TICs), acompanhando o paradigma da Indústria 4.0. Esta metodologia, o *Building Information Modelling* (BIM), permite que ao longo do ciclo de vida de um projeto (conceção,

projetos de execução, construção, manufatura, operação e manutenção) os requisitos e os documentos do projeto estejam disponíveis a todas as entidades responsáveis pela execução do mesmo, permitindo, assim, a devida responsabilização em caso de falha, redução de custos, respeitar os prazos e as normas e efetuar uma gestão da manutenção mais integrada [2].

Concluindo, a manutenção industrial integrada e o BIM procuram o mesmo: redução de custos, a fiabilidade e uma interoperabilidade mais eficiente entre os intervenientes no processo através da utilização de redes colaborativas. Como tal, a aplicação desta metodologia na área da manutenção industrial, que constitui a contribuição inovadora desta dissertação, pode revelar-se uma mais valia para as organizações. A aplicação destes conceitos no âmbito da Indústria 4.0 a uma organização multinacional constitui o principal objetivo deste trabalho, sendo este desenvolvido de forma sustentada e alinhada com as limitações do trabalho em ambiente industrial.

1.2 Objetivos

O objetivo primordial deste trabalho, para além do estudo dos temas em questão, que estão muito na “ordem do dia”, é fazer um levantamento das necessidades e limitações de modo a implementar com sucesso a base da filosofia de modelação BIM no contexto de gestão da manutenção industrial, preferencialmente em ambiente industrial, através da realização de um estágio curricular.

Antes de referir o objetivo deste trabalho, é importante referir que este sofreu uma alteração tendo em conta o contexto da empresa onde o estágio foi realizado. O objetivo inicial seria a adaptação ou, até mesmo, a criação de uma classe de ficheiros IFC para uma família de equipamentos, utilizados na metodologia do BIM, apresentando os indicadores de manutenção característicos de cada família de equipamentos, assim como os respetivos parâmetros de funcionamento, e chegou-se à conclusão de que esta abordagem dificilmente seria adotada a curto prazo pela organização, não sendo ainda o seu impacto percecionado como uma mais valia. Posto isto, o foco passou a ser a preparação da informação através da determinação dos parâmetros de funcionamento das famílias de equipamentos que predominam em algumas áreas chave e que serão alvo de monitorização para que seja possível determinar a condição global dos mesmos, permitindo gerir os equipamentos de uma maneira mais informada e integrada. Com isto, pretende-se comprovar que a implementação da filosofia BIM na gestão da manutenção se revela uma prática com aspetos positivos, reduzindo tempos e custos desnecessários e,

acima de tudo, potenciando a gestão e a visualização da condição global de um equipamento, de um processo, de uma área fabril através da análise da condição do mesmo.

1.3 Estrutura da dissertação

Para além do presente capítulo introdutório, onde se descreve a motivação deste tema e os respetivos objetivos, a dissertação divide-se em mais 5 capítulos. Na figura 1 apresenta-se a estrutura da dissertação através de um fluxograma.

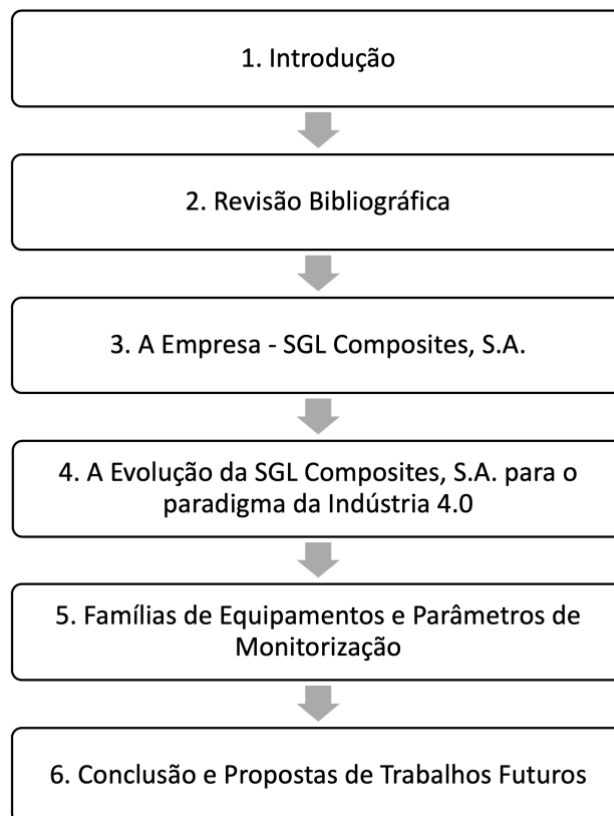


Figura 1 - Fluxograma da Estrutura da Dissertação

No capítulo 1, encontra-se a motivação para este trabalho, assim como os objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 encontra-se uma breve revisão bibliográfica dos diversos temas que são o alvo de interesse desta dissertação: Indústria 4.0, *Building Information Modelling*, Manutenção Industrial e, por fim, Controlo da Condição.

No capítulo 3 é apresentada uma breve descrição da fábrica onde esta dissertação foi desenvolvida. Encontra-se uma breve história da empresa, produtos desenvolvidos, organização do complexo industrial e uma breve descrição do processo produtivo.

No capítulo 4 encontra-se a evolução da SGL Composites, S.A para o paradigma da Indústria 4.0, onde se realiza uma breve síntese das potencialidades da implementação de novas metodologias na manutenção industrial no âmbito da indústria 4.0 e o seu impacto, assim como a aplicação de uma arquitetura de sistemas ciberfísicos para sistemas de produção na SGL Composites, S.A., onde se encontra a digitalização da informação da fábrica, posterior aplicação de sistemas ciberfísicos e, por fim, o desenvolvimento e sugestão de um *layout* para um *software de dashboarding*.

No capítulo 5 está o foco deste trabalho, que é a apresentação das diversas famílias de equipamentos a abordar. Esta abordagem foi feita através de uma breve introdução a cada equipamento, descrição dos elementos que constituem cada equipamento, o seu princípio de funcionamento, a determinação dos parâmetros de desempenho que serão monitorizados em cada um equipamento e, por fim, a apresentação das falhas mais comuns dos equipamentos na sua generalidade e por componente.

Por fim, no capítulo 6, tem a conclusão deste trabalho, onde se resume a informação e contribuição do trabalho, os dados obtidos assim como a relevância dos mesmos e, por fim a apresentação de propostas para trabalho futuro.

2 Enquadramento

2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o resultado da pesquisa bibliográfica realizada para os diversos tópicos que foram alvo de desenvolvimento nesta dissertação.

Após o estudo destes tópicos chegou-se à conclusão de que, tanto o BIM como a Manutenção Industrial, procuram o mesmo, no âmbito da Indústria 4.0. Como resultado da Quarta Revolução Industrial na área da AEC, tem-se desenvolvido novas metodologias que complementam o BIM; de modo análogo, com a implementação e o desenvolvimento de TIC na manutenção industrial, no âmbito da Indústria 4.0, tem-se desenvolvido novas metodologias de monitorização, de controlo e de análise da condição de equipamentos industriais.

Em suma, os tópicos a abordar de modo a que se entenda o desenvolvimento deste trabalho são: a Quarta Revolução Industrial, o BIM, a Manutenção Industrial e o Controlo da Condição.

2.2 A Quarta Revolução Industrial: Indústria 4.0

Como já foi referido anteriormente, esta dissertação é desenvolvida no âmbito da Indústria 4.0. Esta é a Quarta Revolução Industrial, que está a ocorrer neste momento, tratando-se da evolução dos sistemas produtivos industriais, garantindo diversos benefícios para a indústria.

Atualmente, em Portugal, existe um comité estratégico para a Indústria 4.0 responsável pela implementação de medidas que têm como objetivo colocar Portugal na linha da frente da Quarta Revolução Industrial. Trata-se de um desafio que as empresas têm atualmente, patrocinado pela globalização, pela evolução dos sistemas produtivos e pela integração em rede de todos os sistemas. Estes fatores conferem às empresas uma competitividade que promovem a inovação, marcando uma era importante [3].

A Indústria 4.0 é marcada pela integração de sistemas ciberfísicos (*Cyber Physical Systems*, CPS) nos sistemas de produção e logística já existentes, permitindo a partilha de informação em tempo real, através de redes colaborativas, onde a troca de informação entre as máquinas e os humanos é mais rápida, precisa e eficaz, permitindo tomar decisões mais informadas. Entende-se por sistema ciberfísico um sistema computacional com a capacidade de ter uma ligação com o mundo físico envolvente. Como exemplo destes sistemas tem-se a Internet das coisas (*IoT*), o *BigData*, a Inteligência Artificial (IA), as redes colaborativas e os recursos remotos, em *Cloud*. Todos estes elementos, juntamente com os sensores nos processos produtivos, permitem a recolha de dados, e o tratamento dos mesmos, obtendo informações precisas em tempo real, ajudando no processo de tomada de decisão, podendo este ser autónomo ou com intervenção humana.

Em suma, a Quarta Revolução Industrial é marcada pela integração destes sistemas nos processos existentes, otimizando a sua eficiência, precisão e redução de custos, primando pela sustentabilidade e pelo desempenho.

2.3 Building Information Modelling - BIM

2.3.1 Definição

O BIM trata-se de uma abordagem que assenta num novo paradigma baseado em três vetores: Modelo Partilhado 3D do Projeto; Conhecimento; Normas e Interoperabilidade, tal como se esquematiza na Figura 2.

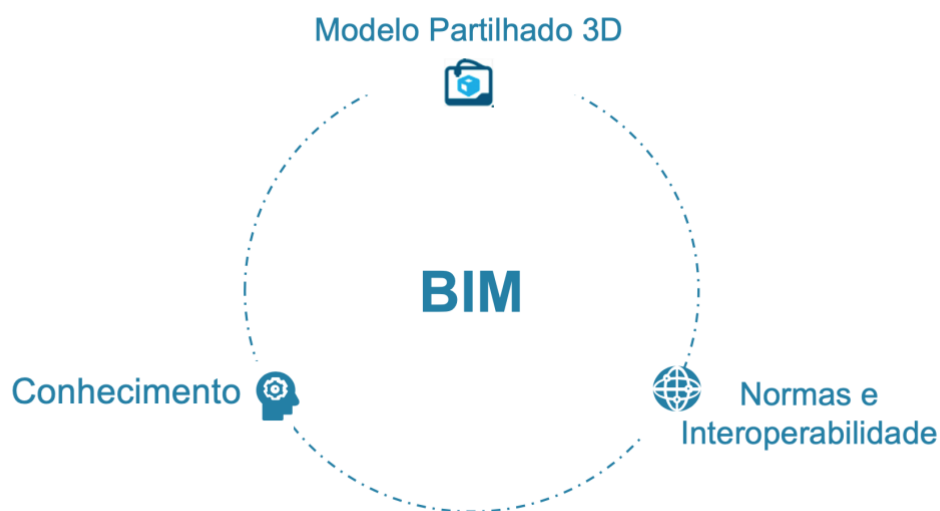


Figura 2 - Vetores do BIM

O BIM pode ser definido como um conceito bastante abrangente que se refere a um conjunto de tecnologias e soluções com o objetivo de melhorar a colaboração interorganizacional na indústria da AEC que visa aumentar a produtividade enquanto aperfeiçoa as práticas de construção e manutenção de projetos. Trata-se de um conjunto de informação que é gerada e mantida durante todo o ciclo de vida de um projeto. Antes do BIM, no momento de modelação de um edifício, no modelo 3D estavam presentes as geometrias e as texturas para efeito de visualização. Com a implementação do BIM, o modelo virtual começou a ser mais completo e pormenorizado. Começaram a fazer parte do modelo informações espaciais, informações geográficas, as quantidades, as propriedades construtivas de componentes, preços e fabricantes. O modelo BIM pode, também, ser utilizado para controlar os custos e gerir os prazos da edificação.

De acordo com a Norma ISO 29481-1:2016, o BIM trata-se do uso de uma representação digital partilhada de um objeto de construção (inclui edifícios, pontes, estradas, plantas de processo, etc.) para facilitar os processos de conceção, de construção e de operação, formando uma base de dados fiável para o processo da tomada de decisões [4].

No entanto, há diversos inconvenientes na utilização do BIM. O maior inconveniente é o investimento no *hardware* e na formação do pessoal para que o BIM seja devidamente implementado, usufruindo de todo o seu potencial.

Posto isto, dada a transversalidade do BIM, é importante referir o que não é o BIM, visto que a sua definição é confundida com a metodologia praticada, tipo de ficheiros e

programas utilizados, uma vez que a representação tridimensional não paramétrica não se trata de um modelo BIM [1].

Com o BIM é possível realizar a gestão da manutenção, isto é, seguir a evolução da degradação através da implementação do levantamento sistemático da sua condição no BIM, possibilitando a tomada de medidas de manutenção e reabilitação mais adequadas e de forma atempada [5]. No que diz respeito ao objetivo deste trabalho, é importante referir que a aplicação do conceito BIM à manutenção industrial é uma novidade, não estando implementado nas versões comerciais do BIM relativo à construção.

2.3.2 Níveis de Informação nos modelos BIM

Com o desenvolvimento de um projeto, acrescenta-se informação ao modelo, existindo diferentes níveis de informação, atendendo ao aumento de complexidade e detalhe do modelo e da informação associada [1].

Resultado da organização da informação do modelo à medida que as diversas entidades envolvidas no projeto o complementam, adicionando informação sob a sua responsabilidade, na Figura 3 podem ser observadas as diversas dimensões do BIM.

| 3D – Modelação Paramétrica | 4D - Planeamento | 5D – Orçamentação | 6D – Sustentabilidade | 7D – Gestão e Manutenção |
|---|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> •Modelo tridimensional; •Visualização aproximada do modelo real. | <ul style="list-style-type: none"> •Visualização do cronograma da obra; •Simulação e adaptação das ações da obra de acordo com as necessidades existentes. | <ul style="list-style-type: none"> •Todos os custos da obra; •Permite gerir o planeamento da obra. | <ul style="list-style-type: none"> •Preocupação ambiental; •Escolha dos materiais. | <ul style="list-style-type: none"> •Plano de Manutenção; •Custos do Ciclo de Vida. |

Figura 3 - BIM 3D a 7D, adaptado de [6]

De acordo com o apresentado na Fig. 3, de seguida estão enunciados e descritos os diferentes níveis de informação nos modelos BIM:

- 3D – Modelação Paramétrica: criação de um modelo tridimensional paramétrico do projeto: visualização aproximada do modelo real através de um *software*;

- 4D – Planeamento: adição do fator tempo ao modelo 3D permitindo a visualização de um cronograma de obra, permitindo simular e adaptar as ações na obra de acordo com as necessidades existentes, agilizando o seu desenvolvimento;
- 5D – Orçamentação: neste nível tem-se em consideração os custos associados à obra. Os custos associados ao projeto são totalmente discriminados no caso de ser necessário efetuar alguma alteração ao projeto na fase de conceção;
- 6D – Sustentabilidade: nesta fase insere-se a preocupação ambiental e a sustentabilidade do edificado ao longo do seu ciclo de vida;
- 7D – Gestão e Manutenção do Edificado: sendo a fase de utilização do edifício a mais longa e dispendiosa, torna-se necessário efetuar um plano de manutenção. Este modelo contém todas as informações dos fabricantes, dos fornecedores, referências e garantias dos equipamentos.

Com a organização de toda a informação de um projeto, é possível efetuar um plano de manutenção preventiva de modo a reduzir custos e desperdícios e outros acontecimentos que colocam em causa a sustentabilidade e a segurança do mesmo. Apesar desta dissertação não tratar de projetos de Engenharia Civil, esta procura inspiração na filosofia BIM para o sucesso de uma manutenção industrial moderna [1, 7].

2.3.3 Ficheiros IFC

Na última década, para garantir a interoperabilidade entre as aplicações, um conjunto de normas internacionais têm sido desenvolvidas por organismos internacionais certificadores, evitando que o desenvolvimento de um projeto esteja condicionado a *softwares* proprietários, permitindo que as várias entidades da AEC não tenham limitações de interoperabilidade e cumpram as normas e leis aplicáveis [2]. No sentido deste cumprimento, existem os ficheiros *Industry Foundation Classes* (IFC). A gestão destes ficheiros é da responsabilidade da *International Alliance for Interoperability* (IAI). “O objetivo da IAI e dos IFCs é o desenvolvimento de um referencial universal para a partilha e troca de informação, isto é, interoperabilidade, de modelos inteligentes de edifícios, sustentados em sistemas baseados em objetos, e para todo o ciclo de vida do projeto” [2].

Por outras palavras, os ficheiros IFC fornecem uma solução de interoperabilidade entre os diversos *softwares* e o seu formato estabelece padrões internacionais para importar e exportar objetos de construção e respetivas propriedades. Também permite

melhorar a comunicação, a produtividade, o tempo de entrega e a qualidade durante todo o ciclo de vida de um edifício, reduzindo perdas de informação entre os diversos *softwares*, estabelecendo padrões para os objetos comuns na indústria da construção [8].

2.4 Manutenção Industrial

De acordo com a Norma Portuguesa de terminologia para a manutenção (NP EN 13306:2007) esta define-se como o resultado da “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida” [9]. A manutenção é um setor com um espaço representativo nos resultados financeiros das grandes organizações industriais, tratando-se de um tema que está em constante pesquisa e desenvolvimento, tendo como objetivo aumentar a fiabilidade e a disponibilidade do processo produtivo e reduzir custos e tempos associados a paragens devido a falhas que se observa durante o processo [10].

Com o rápido desenvolvimento tecnológico, a globalização e o contexto de competitividade dos mercados atuais obtêm-se produtos cada vez mais complexos. De modo a não comprometer a fiabilidade do produto, houve a necessidade de introduzir uma estratégia eficiente no processo produtivo dos mesmos, a manutenção. Numa fase inicial da história da manutenção, esta era praticada apenas quando ocorria alguma falha, uma inconformidade no processo produtivo. Perante este cenário, procedia-se a uma ação de manutenção de caráter corretivo, manutenção corretiva. Com o avanço tecnológico e a crescente consciencialização para o processo da manutenção e respetiva gestão, deu-se o início a práticas de manutenção preventiva sistemática e de manutenção preventiva condicionada [11]. A diferença entre os tipos de manutenção está no momento em que a ação de manutenção é efetuada e na utilização da informação acerca do estado de funcionamento do equipamento. No esquema da Figura 4 observam-se os diversos tipos de manutenção e respetivas classificações.

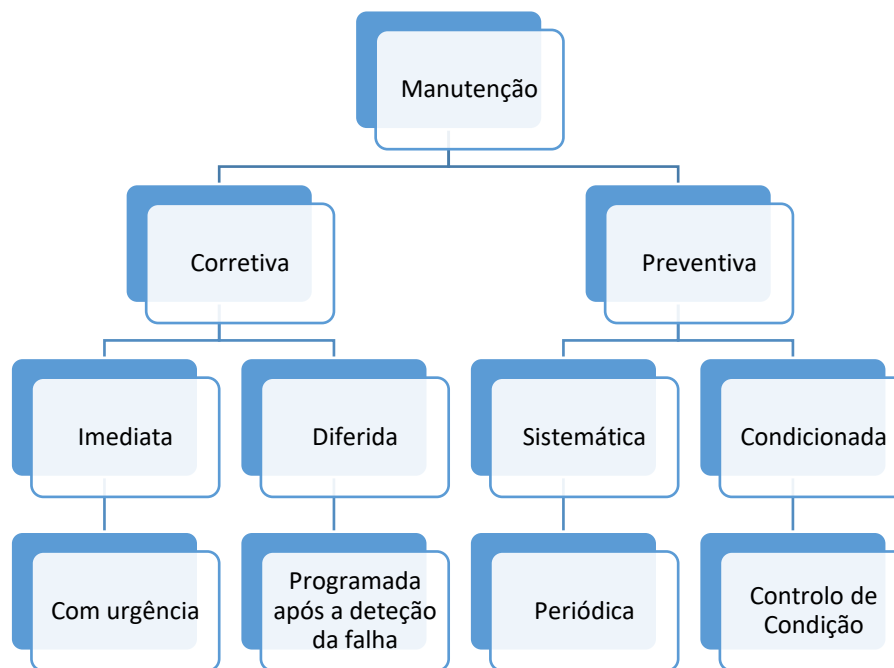


Figura 4 - Tipos de Manutenção, adaptado de [9]

2.4.1 Evolução Histórica do Conceito de Manutenção

De modo a que se entenda o conceito de manutenção atualmente, assim como as respectivas práticas associadas e o seu futuro, é importante referir que a manutenção é o ramo da gestão que mais alterações sofreu nos últimos anos e foram vários os fatores que contribuem para esta evolução. Um dos fatores é o aumento do número e da variedade dos ativos físicos (equipamentos, fábricas e edifícios) que têm de ser mantidos em todo o mundo. Com a evolução tecnológica, novas técnicas de manutenção foram desenvolvidas e o reconhecimento para estas começou a ser maior quando os custos da manutenção tomaram uma porção considerável dos custos da empresa [12].

A resposta da manutenção à mudança de expectativas é também tida em consideração, estas incluem:

- a) A consciência dos riscos de segurança e ambientais quando um equipamento falha;
- b) A associação entre as falhas dos equipamentos e a qualidade do produto;
- c) A maior importância dada à disponibilidade e à fiabilidade dos equipamentos da fábrica;
- d) Os Custos da Manutenção.

Cronologicamente, a manutenção tem evoluído desde 1930 em três grandes períodos:

1. Primeira Geração

Abrange o período até à segunda guerra mundial. Como os equipamentos não eram complexos e a indústria não era automatizada como nos dias de hoje, não havia a necessidade de prevenção de falhas através da aplicação de qualquer tipo de manutenção planeada. Efectuavam-se apenas rotinas simples, tais como a limpeza, a lubrificação e reparação, não havendo a necessidade de operadores altamente competentes. E em caso de falha do equipamento, apenas se efectuava a manutenção corretiva [12].

2. Segunda Geração

A segunda geração tem início após a segunda guerra mundial. Este início é marcado pela mecanização da indústria devido ao aumento da procura de bens de todos os tipos e à queda da mão-de-obra industrial. Posto isto, a complexidade, a diversidade e o número de equipamentos aumentou.

A consciencialização para a necessidade de práticas de manutenção preventiva foi sendo cada vez maior, uma vez que os tempos de inatividade começaram a ser significativos para a produção. Iniciou o conceito de manutenção preventiva sistemática que consistia principalmente na revisão periódica dos equipamentos.

Neste sentido, os custos associados à manutenção foram sendo cada vez mais significativos uma vez que os investimentos efectuados em ativos físicos eram consideráveis e houve a necessidade de maximizar e rentabilizar a vida útil dos ativos [12].

3. Terceira Geração

A terceira geração é marcada pela mudança na indústria na forma como os equipamentos produtivos são percecionados. Com a procura de novas formas para manter os equipamentos, procurou-se maximizar a vida útil dos mesmos, a sua fiabilidade, disponibilidade, segurança, qualidade e controlo dos respetivos custos de manutenção e de produção [12].

Com o aumento da automatização dos processos, houve um aumento do número de avarias com a consequente perda de produtividade e da qualidade. Para colmatar estes fenómenos desenvolveram-se várias técnicas, tais como:

- Manutenção Preventiva Condicionada;

- Ferramentas de suporte à decisão baseadas no risco;
- Análises da árvore de falhas (FTA – *Fault Tree Analysis*).
- Análises dos modos e efeitos de falhas (FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*);
- Análise de modos, efeitos e da criticidade de falhas (FMECA – *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*) [12].

Atualmente, o desafio de um departamento de manutenção foca-se, não em dominar todas as técnicas referidas anteriormente, mas, na decisão das melhores práticas de manutenção dependendo da organização em que se inserem. Tendo como objetivo otimizar a relação custo/benefício da manutenção aplicada a um dado equipamento ou sistema, baseando-se em critérios de fiabilidade para determinar as técnicas de manutenção mais apropriadas a cada modo de falha de um equipamento. Neste sentido, a metodologia assente no objetivo da manutenção é a *Reliability Centered Maintenance* (RCM). [12, 13]

2.4.2 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é efetuada quando ocorre uma falha num determinado sistema ou equipamento podendo levar à paragem da linha de produção. Quando este tipo de falhas ocorre, efetua-se a ação de manutenção corretiva de acordo com a disponibilidade da equipa de manutenção.

A manutenção corretiva divide-se em dois tipos [14]:

- Manutenção corretiva imediata: este tipo de manutenção é executada imediatamente após a deteção da falha, de modo a evitar consequências maiores;
- Manutenção corretiva diferida: este tipo de manutenção não é executada imediatamente após a deteção da falha, sendo programada de acordo com as circunstâncias e respetivas regras pré-definidas.

Os custos associados a este tipo de manutenção podem ser elevados visto que incluem o custo da reparação do equipamento (mão-de-obra e peças necessárias) e os custos associados à paragem não programada da produção.

2.4.3 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é executada com o devido planeamento de modo a proceder à manutenção do equipamento garantindo as condições de funcionamento do mesmo reduzindo a probabilidade de falha.

Segundo a Norma Portuguesa de terminologia para a manutenção (NP EN 13306:2007) a manutenção preventiva é efetuada em intervalos de tempo pré-determinados, ou de acordo com critérios que têm por finalidade a redução da probabilidade de avaria ou degradação do equipamento [9].

Este tipo de manutenção divide-se em dois tipos de manutenção preventiva:

- Manutenção preventiva sistemática: este tipo de manutenção ocorre ciclicamente, tendo sido planeada de acordo com um estudo prévio das falhas do equipamento, recorrendo à análise estatística;
- Manutenção preventiva condicionada: este tipo de manutenção é efetuado tendo como base estudos e inspeções feitas ao equipamento periodicamente e uma monitorização contínua do mesmo.

Enquanto que na manutenção preventiva sistemática as ações de manutenção ocorrem periodicamente, independentemente da condição do equipamento, na manutenção preventiva condicionada, as ações de manutenção só se efetuam quando os indicadores-chave de desempenho, *Key Performance Indicators* (KPI), da monitorização sistemática efetuada ao equipamento indicam a necessidade de uma intervenção.

Posto isto, a manutenção preventiva sistemática é feita tendo por base o registo histórico das falhas do equipamento realizado pela equipa de gestão de manutenção. Os custos associados a este tipo de manutenção têm um peso considerável nos resultados da empresa, no entanto, estes custos garantem a fiabilidade e a qualidade do processo produtivo e do produto final e são, certamente, menores do que os custos associados à manutenção dos equipamentos devido a falhas não previstas e/ou catastróficas, que levam normalmente a consequências mais graves, como lesões por parte dos trabalhadores, e aos custos associados à paragem da linha de produção. O investimento em manutenção condicionada pode ser significativo, pois requer equipas de manutenção melhor formadas e quadros mais qualificados, mas a contribuição para o sucesso da produção justifica o investimento [17].

2.4.4 Custos de Manutenção

Os custos de manutenção de um determinado equipamento são um indicador da sua disponibilidade e fiabilidade. Estes custos podem estar diretamente ou indiretamente relacionados com as ações de manutenção [18].

Em manutenção, os custos são considerados, por muitas organizações, gastos ocultos uma vez que são desprezados no momento de investimento de um equipamento novo. [12]. No entanto, seria mais relevante destacar a tendência para considerar a manutenção como parte do exercício de contabilidade global, em vez de ser considerada apenas um centro de custos. Desta maneira, pretende-se criar uma visão mais positiva e integradora da manutenção no seio das organizações.

A rentabilidade económica da exploração dos equipamentos são um indicador para a avaliação do desempenho de um equipamento, posto isto, os custos da manutenção devem, também, ser um indicador para avaliar o desempenho da manutenção. Assim, a análise dos custos da manutenção torna-se uma prioridade, uma vez que os custos da manutenção podem estar diretamente ou indiretamente relacionados com as ações de manutenção [12].

Neste sentido, os custos da manutenção são a soma dos Custos Diretos e dos Custos Indiretos.

Custos Diretos

Os custos diretos da manutenção são os que estão, de certo modo, diretamente relacionados com a operação de manutenção [12]. Estes englobam:

- Custos de manutenção regulares – são os custos das operações de manutenção sem as quais o equipamento não funcionaria, por exemplo: inspeções técnicas e testes;
- Custos de mão de obra – custos do pessoal qualificado, de todos os níveis, que trabalham para manter o equipamento em funcionamento;
- Custos do equipamento – inclui ferramentas, instrumentos ou máquinas complementares ao funcionamento do equipamento após o seu arranque;
- Custos de formação – custos da formação da mão de obra para que esta se mantenha atualizada, face à evolução tecnológica;
- Custos de subcontratação – custos associados à subcontratação de trabalhos de manutenção quando, por razões técnicas ou económicas, são justificados pela correta gestão dos equipamentos;

- Atualização tecnológica – custos decorrentes de pequenas obras realizadas internamente para modificar ou construir parte dos equipamentos, permitindo satisfazer as necessidades produtivas.

Custos Indiretos

Os custos indiretos da manutenção são os custos causados por falhas inesperadas nos equipamentos devido à deficiente ou falta de manutenção dos mesmos, sendo uma perda financeira para a empresa. A análise destes custos não é precisa, visto que estes custos não são diretamente mensuráveis [12]. Os custos indiretos da manutenção incluem as seguintes situações:

- Redução de produção ou de serviço – quando o nível de produção ou do serviço reduzem, tem-se os custos associados à falta de rendimento, ou seja, são os custos do que se poderia estar a produzir, mas que não é produzido;
- Alteração na qualidade da produção ou do serviço – a alteração da qualidade da produção ou do serviço podem dever-se a manutenção insuficiente e os custos associados a esta alteração só são sentidos mais tarde no mercado, porque a insatisfação dos clientes gera consequências tais como a redução do preço ou a perda de mercado;
- Atrasos nas entregas – as duas situações referidas anteriormente causam atrasos na produção, causando, conseqüentemente, atrasos nas entregas, penalizando contratos, representando um custo suplementar de falha;
- Custos de amortização – custos decorrentes da amortização do equipamento tendo em conta o seu tempo útil de vida; os custos de amortização dos equipamentos são minimizados com o aumento do seu tempo de vida útil, reduzindo as falhas através de ações de manutenção;
- Acidentes de trabalho – para além do bom funcionamento dos equipamentos, umas das prioridades da manutenção é a segurança de funcionamento e a segurança do pessoal; existe uma relação direta entre a qualidade da manutenção e o número de acidentes de trabalho, portanto, traduz-se num custo;
- Imagem da empresa – todos os fatores referidos anteriormente culminam com uma representação negativa para a empresa, traduzindo-se em custos que devem ser reduzidos, o quanto antes.

Estes são alguns dos custos indiretos da manutenção. Cada um destes custos tem uma relevância diferente por parte da administração. Estes custos não são facilmente detetáveis nem quantificáveis, sendo estimados por fatores de avaliação imprecisos [12].

No entanto, os custos decorrentes das ações de manutenção praticadas para detetar as anomalias, intervindo sobre estas antecipadamente, são menores do que os custos decorrentes destas falhas que podem ser catastróficas, colocando em causa a segurança dos operadores.

2.5 Controlo de Condição

Atualmente, o Controlo de Condição dos equipamentos é uma parte da Manutenção Baseada na Condição (*Condition-based Maintenance*, CBM) e está a ter um reconhecimento cada vez maior por parte de diversas indústrias como uma das estratégias mais eficientes a adotar. O Controlo de Condição de equipamentos é efetuado utilizando técnicas de deteção e diagnóstico de avarias através da avaliação e monitorização do estado de condição dos sistemas mecânicos.

Para que a manutenção seja efetuada de acordo com a análise da condição, os equipamentos têm que estar nas condições normais de funcionamento. Para que isto seja possível, foram desenvolvidas técnicas que permitem analisar e diagnosticar o estado de funcionamento dos equipamentos enquanto estes estão em operação. A monitorização da condição de um equipamento é baseada na capacidade de análise e previsão de estados futuros do equipamento tendo em conta a monitorização do equipamento em operação. Isto implica a existência de dispositivos externos capazes de obter dados sobre o estado interno do equipamento. Posteriormente estes dados são tratados e consegue-se obter informações acerca da sua condição.

São várias as técnicas que permitem efetuar o controlo da condição dos equipamentos, tais como: Análise de Vibrações; Análise de Lubrificantes; Termografia; Ultrassons; Radiografia; Líquidos Penetrantes, entre outros. De seguida, abordam-se duas das principais técnicas de monitorização: a Análise de Vibrações e a Análise de Lubrificantes [17]. Estas técnicas, para além de serem muito frequentes, globalmente, são praticadas na empresa.

2.5.1 Principais Técnicas de Monitorização

A Análise de Vibrações é a técnica com maior aplicação no controlo da condição de equipamentos e tem uma série de vantagens relativamente a outras técnicas. Permite detetar, prematuramente, anomalias em diversos componentes dos equipamentos [17].

Definindo o termo vibração, trata-se do movimento de um ponto ou sistema oscilando em torno de uma posição de referência, ou equilíbrio estático. As vibrações medidas nos equipamentos devem-se a cargas dinâmicas que podem ter fontes bastante distintas, como tolerâncias construtivas, folgas, rolamentos, atritos, desequilíbrios e forças exteriores desequilibradas, comum em equipamentos rotativos. Existem também cargas dinâmicas que, dado o seu conteúdo em frequência, podem excitar frequências naturais do sistema ocorrendo o fenómeno de ressonância, sendo importante minimizar as vibrações desta natureza desde a fase de projeto do equipamento [18].

Um equipamento em funcionamento possui um nível de vibração característico. O desenvolvimento de falhas altera o nível de vibração do equipamento, estando diretamente relacionado com a falha. Posto isto, a medição e análise de vibrações é justificada pela relação existente entre as vibrações dos equipamentos e as suas avarias.

Através da monitorização contínua dos equipamentos utilizando a medição e a análise de vibrações é possível tornar as práticas de manutenção preventiva mais eficientes. Através da utilização desta técnica destacam-se as seguintes vantagens:

- Detecção da maioria das avarias;
- Detecção das avarias numa fase inicial, através da aplicação do método de análise de tendências nos dados recolhidos;
- Detecção das avarias enquanto o equipamento está em funcionamento;
- Permite diagnosticar a causa da avaria.

No momento de medição das vibrações é necessário ter em atenção que cada equipamento pode ter necessidades de monitorização diferentes, e a própria técnica de medição de vibrações depende das características do mesmo. Só assim é possível cumprir a redução dos custos e da operacionalidade dos sistemas. Para efetuar a medição das vibrações existem três tipos de transdutores: de deslocamento, de velocidade e de aceleração. A seleção do transdutor depende da velocidade de rotação de um equipamento. Existem também vantagens e desvantagens associadas a esta escolha, não sendo o foco desta dissertação. O posicionamento dos sensores é, também, importante pois depende do tipo de equipamento que se pretende analisar e do tipo de avaria.

Quando se efetua a medição é possível determinar as frequências características do equipamento e medir os níveis globais de vibração do mesmo. No momento de análise de vibrações, através da análise espectral é possível verificar padrões, tais como: valores de amplitude, harmónicas, bandas laterais. Após a identificação destes padrões torna-se possível especificar o tipo de avaria de acordo com a observação efetuada. São diversos os tipos de avarias, sendo os mais comuns: o desequilíbrio, o desalinhamento, veios empenados, folgas e avarias em rolamentos [19].

Análise de Lubrificantes

A análise de lubrificantes é uma técnica de monitorização que pode ser dividida em diferentes categorias:

1. Detecção de partículas magnéticas - filtros e detetores magnéticos são projetados para reter qualquer partícula magnética em suspensão nos lubrificantes. Estas partículas são analisadas quanto à sua quantidade, tipo, forma e tamanho.
2. Programa de Análise Espectrométrica de Lubrificantes (*Spectrographic Oil Analysis Program (SOAP)*) - efetua-se a recolha de amostras de lubrificante regularmente e são sujeitas a análise espectrométrica. A espectrometria permite detetar a existência de outros materiais, identificando-os. A identificação dos mesmos permite saber qual a condição atual do equipamento. Esta análise inclui, também, a análise de resíduos de desgaste, contaminantes e aditivos, permite também determinar a viscosidade do fluído e o respetivo nível de degradação.
3. Ferrografia - Esta análise consiste numa investigação microscópica com o objetivo de detetar partículas magneticamente, podendo conter outras partículas não magnéticas agregadas às primeiras

Em suma, a análise de lubrificantes permite detetar e analisar partículas de desgaste, sendo uma ferramenta de deteção de falhas. No entanto, esta técnica apresenta algumas limitações, prendendo-se com os custos dos equipamentos de análise, precisão dos resultados das amostras recolhidas e a interpretação dos mesmos [10].

3 A Empresa – SGL Composites, S.A.

Uma vez que esta dissertação foi realizada em parceria com uma empresa, a SGL Composites, S.A., neste capítulo encontra-se uma breve descrição da empresa, assim como a sua história, a organização do complexo industrial, a descrição do processo de fabrico e os produtos produzidos.

3.1 Caracterização da Empresa

A SGL Composites, S.A. é uma fábrica produtora de fibras acrílicas sediada no Lavradio, Portugal, desde 1976. A empresa foi constituída em 1973, fruto de um joint-venture entre a CUF (Companha União Fabril) e o grupo japonês Mitsubishi. Em setembro de 2012 o grupo alemão SGL, o maior produtor europeu de fibras de carbono, concluiu a aquisição de 100% do capital da empresa, inicialmente denominada de FISIFE, S.A.

Inicialmente, era uma fábrica produtora de fibras têxteis standard e, ao longo da sua vida, foi-se transformando numa empresa de fibras acrílicas especiais, nomeadamente as fibras pré-tintas, funcionais e para aplicações técnicas. A empresa atua no mercado internacional exportando 99% da sua produção.

Tendo como base a visão estratégica da empresa – apostar, através da inovação e da pesquisa sistemática, em novas aplicações para a fibra acrílica e em novas necessidades

nos segmentos atuais – a empresa começou a desenvolver os precursores de fibra de carbono (PFC).

A aposta na produção da fibra de carbono ganhou outra dinâmica e dimensão com a entrada da FISIPE, S.A. no grupo SGL, implicando a conversão gradual de algumas linhas de produção de fibras têxteis já existentes para a produção das novas fibras de elevada qualidade (PFC).

Dada a entrada da FISIPE, S.A. no grupo SGL, em novembro de 2018, com o processo de *rebranding* do grupo SGL, a FISIPE, S.A. passa a chamar-se SGL Composites, S.A. A estratégia da empresa é clara e assumida por todos os colaboradores: a prioridade está na qualidade e sofisticação dos produtos comercializados e não na quantidade produzida, visando entrar nas chamadas aplicações técnicas, onde os precursores das fibras oxidadas e das fibras de carbono são o expoente máximo [20].

3.2 Produtos

A SGL Composites, S.A. produz quatro tipos de fibras acrílicas que são caracterizadas da seguinte maneira:

- Crua comercializada com a marca FISIVON;
- Fibra pigmentada;
- Fibras técnicas;
- Fibra tinta gel *deyed*.

Estas fibras destinam-se ao uso pela indústria têxtil como matéria prima principalmente para produção de fios que serão sobretudo aplicados na fabricação de malhas, tecidos e tapetes, pela indústria de construção civil, pela indústria de componentes automóveis e para outras aplicações técnicas.

A comercialização das fibras faz-se em três formas diferentes:

- CABO – Fibra continua em fita;
- RAMA – Fibra cortada;
- TOP – Cabo Convertido e Penteado

As fibras produzidas pela SGL Composites, S.A. dividem-se nas seguintes categorias:

- ***Acrylic Fibers Color Fisivon*** – Fibra tinta pelo processo tecnologicamente mais avançado de tingimento em linha – *Gel Dying Process*. Este é o processo de tingimento mais ecológico e eficiente
- ***Acrylic Fibers Pil Clean*** – Fibra com excelentes resultados de *pilling*; permite manter o aspeto novo dos artigos durante mais tempo.
- ***Acrylic Fibers Flat*** – Fibra de secção plana, perfeitamente retangular e que imita com perfeição o pelo animal, originando um tecido de aspeto natural e tato suave.
- ***Acrylic Fibers Sunlast*** – Fibra acrílica pigmentada que resiste à luz solar e à degradação causada pela exposição prolongada aos agentes meteorológicos mantendo a máxima solidez da cor.
- ***Acrylic Fibers Pluma*** – Fibra de secção especial que proporciona afeitos com maior voluminosidade e toque particularmente macio.
- ***Acrylic Fibers Binder*** + – Fibra acrílica que une componentes de mistura, criando uma rede tridimensional altamente coesa, com melhor desempenho mecânico e durabilidade. O uso desta fibra em matrizes de gesso e cimento fornece uma solução para superar problemas comuns resultantes da dura (vaporização da água) desses materiais [21].

3.3 A Fábrica

A SGL Composites, S.A. produz fibra acrílica e fibras técnicas. Este processo de produção requer várias operações estando, como tal, organizada em diferentes produções e diversas Áreas Fabris. Estas Áreas Fabris são:

- Solventes e Utilidades (SU)
 - Área de Recuperação de Solvente (SR)
 - Parque de Tanques (TF)
 - Área de Utilidades (UT)
- Polimerização Contínua (CP)
 - Área de Polimerização Contínua (CP)
 - Parque de Silos (PS)
- Produção de Produtos Intermédios (PPI)
 - Área de Preparação de Xarope (DP)
 - Área de Extrusão – Spinning (SP)
- Produção de Produtos Acabados (PPA)

- Área de Corte e Embalagem (CB)
- Área de Conversão de Cabo – Tow-to-top (TTT)
- Instalação Piloto (IP)
 - Instalação Piloto 1
 - Instalação Piloto 2
- Laboratório (LAB)
 - Controlo e Reprodução de Cores
 - Ensaaios Químicos
 - Ensaaios Físicos
 - Laboratórios de Área – Apoio à Produção
- Manutenção
 - Manutenção Elétrica e Instrumentação (MEI)
 - Manutenção Mecânica (MM)
- Armazéns
 - Armazém de Produtos Acabados (APA)
 - Armazém de Peças de Reserva (APR)

3.3.1 Processo de fabrico de fibra

O processo de produção de fibra é complexo e requer conhecimentos de várias áreas. Este processo inicia-se na Área de Polimerização Contínua (CP), onde ocorre a reação de polimerização de co monómeros, terminando com a formação de *pellets* que são, posteriormente, moídos e transformados em pó. De seguida, na Área de Preparação de Xarope (DP), o xarope é obtido por dissolução do polímero em pó num solvente. O xarope é transformado em fibra através do processo de extrusão da solução de polímero em solvente na Área de *Spinning* (SP) e, por fim, termina na Área de Corte e Embalagem (CB) antes de ser expedida para o cliente. Estas Áreas encontram-se apoiadas pela Área de Utilidades (UT) e pela Área de Recuperação de Solvente (SR). Na Figura 5 temos a sequência de produção das fibras acrílicas.

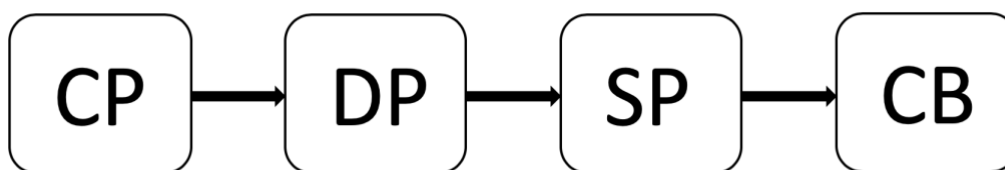


Figura 5 - Sequência de processo da produção de fibra

De seguida está uma breve descrição do funcionamento das diversas Áreas Fabris.

i) Polimerização Contínua (CP)

Os monómeros de Acrilonitrilo e Acetato de Vinilo são bombeados dos respetivos tanques do parque de tanques para os tanques de alimentação e mistura, onde posteriormente são misturados juntamente com os monómeros provenientes do sistema de recuperação de monómeros. Esta mistura de monómeros vai alimentar os reatores onde, sob condições controladas e na presença de vários aditivos, é obtido por polimerização em dispersão aquosa um polímero.

A suspensão aquosa de polímero proveniente dos reatores e à qual é adicionado o inibidor, é submetida a destilação sob vácuo numa coluna de *stripping*, sendo em seguida o polímero filtrado e lavado num filtro rotativo de vácuo. O polímero húmido resultante da filtração passa num peletizador, sendo os peletes de polímero enviados a um secador de tela. Os peletes secos são desfeitos num moinho de martelos e de seguida o polímero, na forma de um pó fino, é transportado pneumáticamente para os silos de armazenagem [20].

ii) Preparação de Xarope (DP)

Na área de preparação de xarope, o polímero é continuamente misturado com dimetilacetamida arrefecida, para assim produzir uma suspensão. A suspensão de polímero é aquecida para dissolver o polímero no solvente, transformando-se assim numa solução de elevada viscosidade chamada Xarope Brilhante, este, depois de filtrado através de um conjunto de filtros prensa, para remover partículas não dissolvidas, é finalmente bombeado para a área de *spinning*.

Quando ocorre desperdício de polímero, xarope e fibras, estes são reprocessados num sistema de recuperação, originando um Xarope Regenerado que é bombeado para a área de fiação para produzir fibra de segunda qualidade [20]

iii) Spinning (SP)

O xarope proveniente da Área DP é bombeado para as máquinas de extrusão, sendo extrudido através de fieiras para banhos que contém misturas água/solvente, onde tem lugar a coagulação dos filamentos.

Os filamentos coagulados são agrupados em fitas e depois estirados e lavados para remoção do solvente. Adicionalmente são tratados com uma mistura de agentes de acabamento, secos em rolos secadores, frisados e finalmente recolhidos em contentores. O efluente dos banhos de coagulação e as águas de lavagem são bombeados para área SR para separação e recuperação do solvente e da água.

Em parte do xarope brilhante pode ser alternativamente injetada uma suspensão de um deslustrante previamente preparada no sistema de preparação da suspensão de dióxido titânio para permitir a produção de xarope mate [20].

iv) Corte e Embalagem (CB)

Na Área de Corte e Embalagem, a fibra proveniente da Área SP sofre primeiramente um tratamento térmico com vapor em autoclaves, a fim de eliminar as tensões internas da fibra e melhorar as suas propriedades físicas. Parte da fibra assim recozida é embalada para expedição na forma de cabo. A restante fibra volta a ser frisada e é cortada no comprimento de fibra desejado dando origem a rama que é embalada em fardos para expedição.

Na produção de uma rama tipo *high-bulk*, o cabo recozido no autoclave é estirado numa atmosfera de vapor e só depois cortado para dar origem a uma rama retrátil [20].

v) Conversão Tow-to-top (TTT)

O cabo produzido na Área de Corte e Embalagem pode ser transformado na Área *Tow-To-Top*.

O cabo é submetido a um conjunto de estiramentos controlados e convertido numa mecha contínua de fibras cortadas. As mechas assim obtidas são misturadas e penteadas obtendo-se assim uma mecha final top.

Por fim, o resultado obtido é prensado e enfardado para expedição [20].

vi) Recuperação de Solvente (SR)

As soluções aquosas do solvente recebidas da área de fiação são separadas por destilação na área de recuperação do solvente em solvente e água recuperada para serem novamente usados nas áreas DP e SP.

As impurezas sólidas são separadas e os produtos de hidrólise do solvente são removidos e recuperados [20].

vii) Utilidades (UT)

As áreas fabris necessitam, para a sua atividade, de diversas utilidades que serão consumidas ao longo de todo o processo. A área de Utilidades dispõe de instalações para produção e fornecimento de: água industrial (W); água gelada (CW); água de refrigeração (TW); água desionizada (DIW); azoto (IG); vapor e ar comprimido para uso geral e para processo e instrumentos [20].

Na Figura 6 está resumido o fluxo do processo da fábrica.

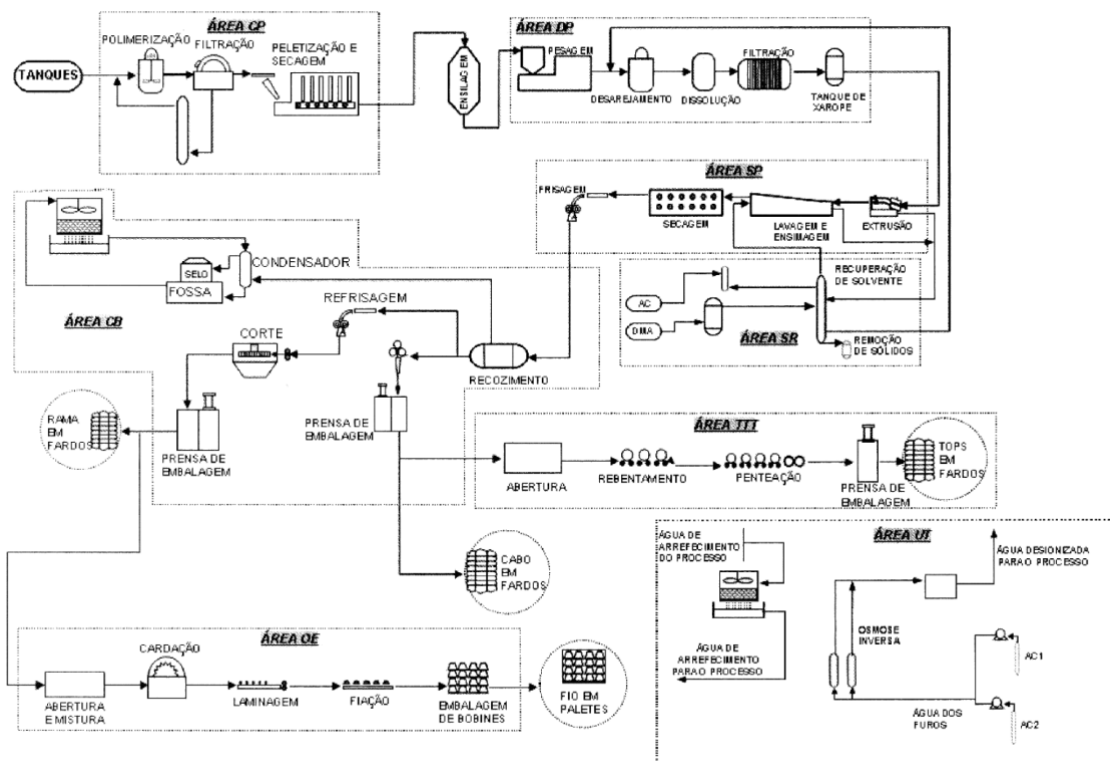


Figura 6 - Fluxo do processo de produção da SGL Composites, S.A., adaptado de [13]

4 A Evolução da SGL Composites S.A. para o paradigma da Indústria 4.0

Após a apresentação da Indústria 4.0 e da empresa, já é possível efetuar um levantamento das potencialidades da implementação de novas metodologias na manutenção industrial no âmbito da indústria 4.0 no contexto da SGL Composites S.A. Desta forma apresentam-se as inovações que a implementação de sistemas ciberfísicos trouxeram para a gestão da manutenção e uma arquitetura de sistemas ciberfísicos para sistemas de produção baseados na Indústria 4.0 tendo em conta o contexto da empresa.

4.1 As inovações que a implementação de sistemas ciberfísicos trouxeram para a gestão da manutenção

O avanço dos sistemas ciberfísicos está a solidificar a Quarta Revolução Industrial. Com este avanço tem havido cada vez mais especulações sobre o futuro da gestão da manutenção e sobre o impacto que estas tecnologias terão nas práticas da manutenção industrial. São várias as potencialidades deste fenómeno, tais como:

1. Simplificação do processo de planeamento e controlo de manutenção através da implementação de sistemas desenvolvidos para avaliar e reconhecer padrões dos dados que são recolhidos através da monitorização contínua dos parâmetros de funcionamento dos equipamentos, definindo limites e alarmes, se necessário, lançando ordens de manutenção automaticamente para programar uma intervenção, evitando uma potencial ocorrência de falha;

2. Otimização das práticas de manutenção centrada na fiabilidade através da utilização de sistemas que fazem análises estatísticas ao histórico dos equipamentos, à procura de padrões para que seja possível calcular e prever a probabilidade de falha dos equipamentos;
3. Otimização do processo de elaboração, supervisão e atualização do orçamento da manutenção, permitindo o controlo de stocks de peças de reposição e, através de sistemas de reconhecimento de padrões, identificar os mesmos, sendo um indicador de alguma ocorrência no futuro;
4. Controlo e atualização automática do valor dos ativos, tendo em consideração a depreciação dos mesmos através do histórico e dos sintomas observados a partir da manipulação de dados analisados estatisticamente pelos sistemas;
5. Desenvolvimento de um conjunto de metodologias que permitem consolidar a gestão da manutenção e de ativos, mantendo-os em condições operacionais, garantindo mensurar o valor de mercado das empresas de uma forma precisa [22].

4.2 Arquitetura de Sistemas Ciberfísicos para Sistemas de Produção baseados na Indústria 4.0

Os avanços tecnológicos que se fizeram sentir recentemente na indústria da manufatura levaram à implementação sistemática de sistemas ciberfísicos. Isto permitiu que os equipamentos monitorizados e os dados provenientes desta monitorização sejam guardados e sincronizados entre o chão de fábrica e o sistema ciberfísico. Com a análise avançada destes dados obtém-se informações que permitem que os equipamentos ligados em rede funcionem com mais eficiência, robustez, operando num ambiente de redes colaborativas. Esta tendência está a transformar a indústria, levando à próxima revolução industrial, a Indústria 4.0. No contexto da SGL Composites, S.A., apresenta-se de seguida uma arquitetura unificada de 5 níveis que servirão de diretriz para a implementação do CPS.

Nesta nova revolução industrial assiste-se à união entre os equipamentos, dispositivos e instrumentos presentes no chão de fábrica com as capacidades de

computação existentes atualmente. Visto que o CPS está numa fase inicial do seu desenvolvimento é necessário definir a estrutura e a metodologia para a sua implementação na indústria. Neste seguimento, a arquitetura para a implementação do CPS está dividida em 5 níveis. De um modo geral, um CPS consiste, essencialmente, em dois componentes funcionais principais:

- Conetividade avançada que garante a aquisição de dados em tempo real, retirar informações e feedback do espaço ciberfísico;
- Gestão inteligente de dados, capacidade computacional analítica que constitui o espaço ciberfísico.

De seguida temos a apresentação e descrição dos 5 níveis que constituem a arquitetura da implementação dos CPS:

Nível 1 – Conexão Inteligente (*Smart Connection*)

O primeiro passo para o desenvolvimento da aplicação de um sistema ciberfísico passa pela recolha fidedigna de dados dos equipamentos e respetivos componentes através da monitorização da condição.

Nível 2 – Conversão dos Dados em Informação (*Data-to-information conversion*)

O segundo passo é a extração de informação dos dados através da utilização de algoritmos, prevendo a condição do equipamento, permitindo efetuar a gestão do mesmo

Nível 3 – Nível cibernético (*Cyber*)

Nível onde toda a informação é centralizada, processada e comparada num sistema ciberfísico.

Nível 4 – Nível de Cognição (*Cognition*)

Neste nível geram-se as decisões a tomar tendo em conta o conhecimento adquirido até à data.

Nível 5 – Nível de Configuração (*Configuration*)

Por fim, neste nível é efetuada a configuração do equipamento para que funcione de acordo com os objetivos de produção pretendidos, implementando ações corretivas. Esta configuração é obtida através do processamento dos dados, comparação dos resultados, histórico e decisões tomadas pelo nível anterior, o nível de cognição.

Em suma, a implementação de sistemas ciberfísicos com a arquitetura descrita anteriormente em sistemas de produção permite que todos os equipamentos tenham capacidade de funcionar autonomamente, tomando as decisões necessárias em tempo útil, minimizando, tempos de paragem garantindo a otimização do planeamento de produção e o planeamento de gestão de inventário. Os cinco níveis que constituem a arquitetura da implementação de CPS consistem num guia viável e prático para a sua implementação na indústria garantindo a fiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos [23].

4.3 Aplicação da Arquitetura de Sistemas Ciberfísicos para Sistemas de Produção baseados na Indústria 4.0 na SGL Composites, S.A.

4.3.1 Introdução

Nesta secção, para que se entenda a lógica por detrás da aplicação da arquitetura de sistemas ciberfísicos na fábrica, iremos dividir em três secções, tendo sempre como objetivo a visualização da informação através de um *software dashboarding*.

Na primeira secção, no seguimento da digitalização da informação, será organizada e estruturada a informação da fábrica. De seguida, após a estruturação da informação, aplica-se a arquitetura de sistemas ciberfísicos à fábrica. Por fim, encontra-se uma sugestão e respetiva explicação da estruturação da informação através de um *software dashboarding*.

4.3.2 Organização e Estruturação da Informação da fábrica

Para que seja possível determinar a condição global da fábrica através da aplicação da arquitetura de sistemas ciberfísicos, numa primeira fase estruturou-se o fluxo da informação desde a recolha dos dados através do controlo da condição dos equipamentos até à determinação da condição global da fábrica. Posto isto, é necessário ter em conta cada área fabril, cada processo, cada família de equipamentos e cada parâmetro de monitorização para determinar a condição global da fábrica. Na Figura 7 encontra-se o fluxo de informação da SGL Composites, S.A.

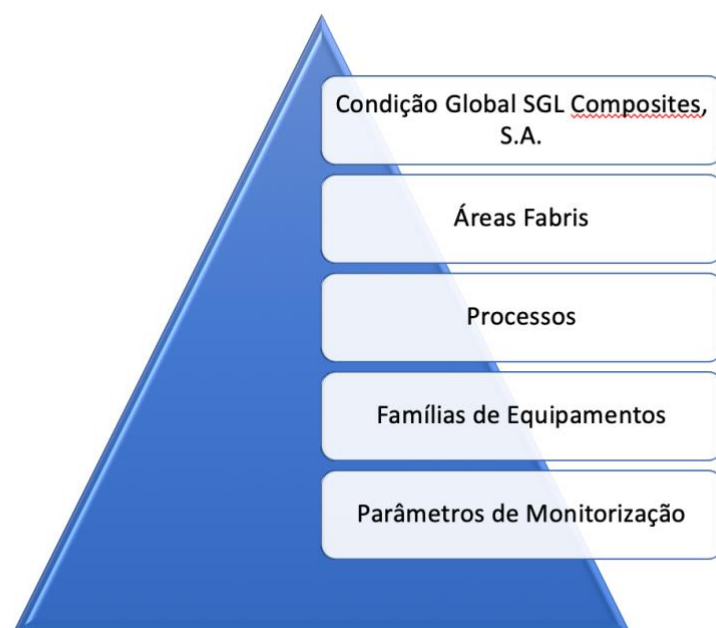


Figura 7 - Estrutura do Fluxo de Informação da SGL Composites, S.A.

Entrando num maior nível de detalhe da organização da informação, como foi visto no Capítulo 3, as áreas fabris que constituem a fábrica são a Polimerização Contínua (CP), Preparação de Xarope (DP), Spinning (SP), Corte e Embalagem (CB), Recuperador de Solvente (SR) e Conversão *Tow-to-top* (TTT). Tomando como exemplo o SP, os processos que o constituem são: extrusão, lavagem, tingimento, acabamento, estiragem, secagem e frisão. Cada um dos processos do SP possui as respetivas famílias de equipamentos. No entanto, para proteger a informação da fábrica, não será especificado as famílias de equipamentos pertencentes a cada processo, ficando apenas registado as famílias de equipamentos que foram alvo de estudo, presente no capítulo 5, assim como os parâmetros de monitorização. A mesma família de equipamento pode estar presente em processos diferentes da mesma área fabril e de outras áreas fabris, no entanto, concetualmente, os parâmetros de monitorização serão os mesmos, possivelmente com níveis limite adequados a cada processo. Na Figura 8 é possível visualizar a organização da informação relativa ao SP.

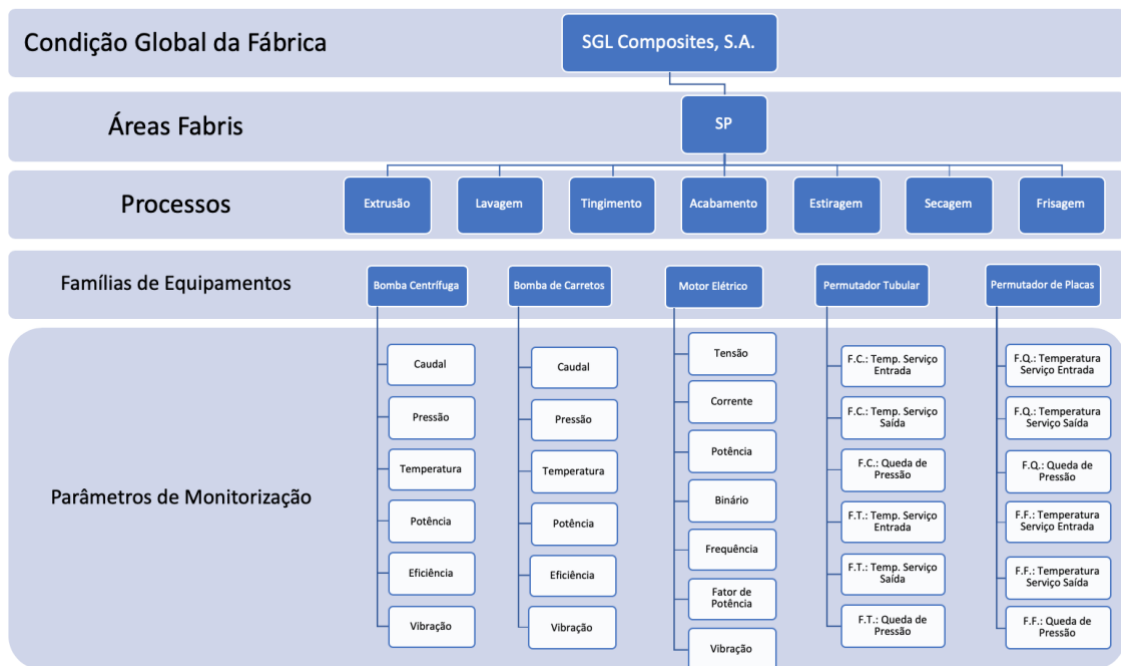


Figura 8 - Estruturação da Informação do SP

4.3.3 Aplicação da arquitetura de sistemas ciberfísicos à fábrica

Uma vez que o fluxo da informação já se encontra organizado, procede-se à implementação da arquitetura de CPS. Ao nível 1 pertence a recolha dos dados, que são constituídos pelos parâmetros de monitorização dos equipamentos. Ao nível 2, onde se efetua a conversão dos dados em informação, pertence às famílias de equipamentos. Neste nível já é possível determinar a condição dos equipamentos através do tratamento dos dados recolhidos no nível anterior. Ao nível 3, nível onde toda a informação é centralizada, processada e comparada num *software*, pertencem os processos e as áreas fabris, permitindo obter a condição de cada um destes, determinando, assim, a condição global da fábrica. O nível 4 e o nível 5 é comum a toda a estrutura pois, em manutenção, qualquer *feedback* dado pelo CPS contribui para as tomadas de decisões de manutenção. Na Figura 9 apresenta-se o esquema da aplicação da arquitetura de CPS na fábrica.

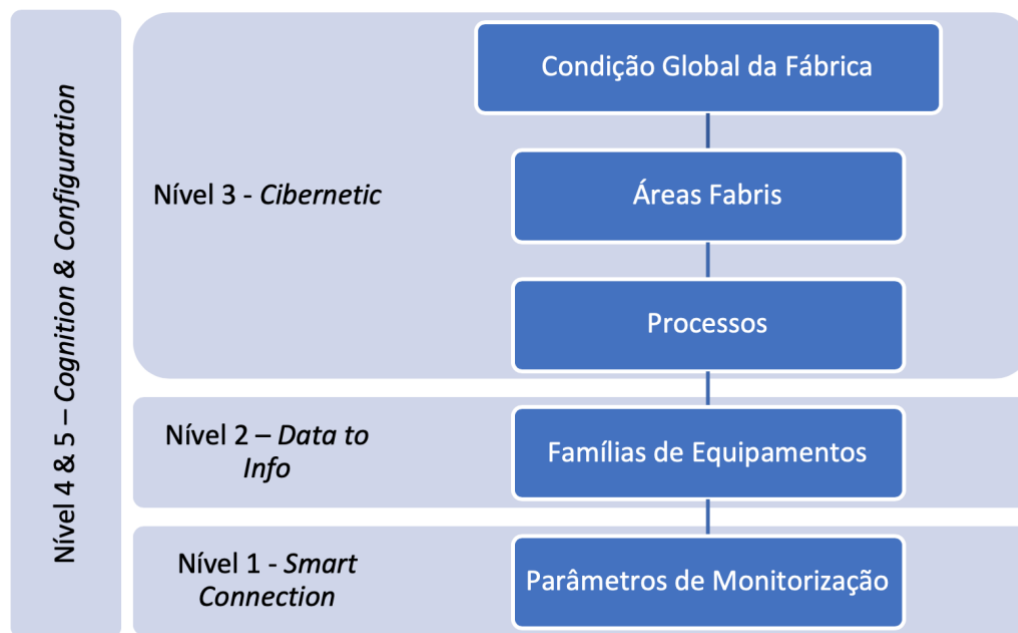


Figura 9 - Aplicação da arquitetura de CPS na SGL Composites, S.A.

4.3.4 Sugestão de *layout* para *software* de *dashboarding*

Para que, de futuro, a fábrica possa usufruir da aplicação da arquitetura de CPS, e uma vez que um dos grandes investimentos da fábrica tem sido na conversão dos equipamentos para que seja possível efetuar monitorização contínua dos mesmos através da análise dos parâmetros de funcionamento, centralizando a informação, procedeu-se à sugestão de um *layout* para ser utilizado num *software* de *dashboarding* para dispor a informação tratada. No Figura 10 encontra-se a sugestão de um *layout* para dispor a informação tratada através de um *software* de *dashboarding*. Um *software* de *dashboarding* trata-se de uma plataforma de análise de dados que permite combinar qualquer fonte de dados, explorando qualquer área da fábrica e qualquer conjunto de dados obtendo um conjunto de visualizações e sugestões geradas pelo CPS.

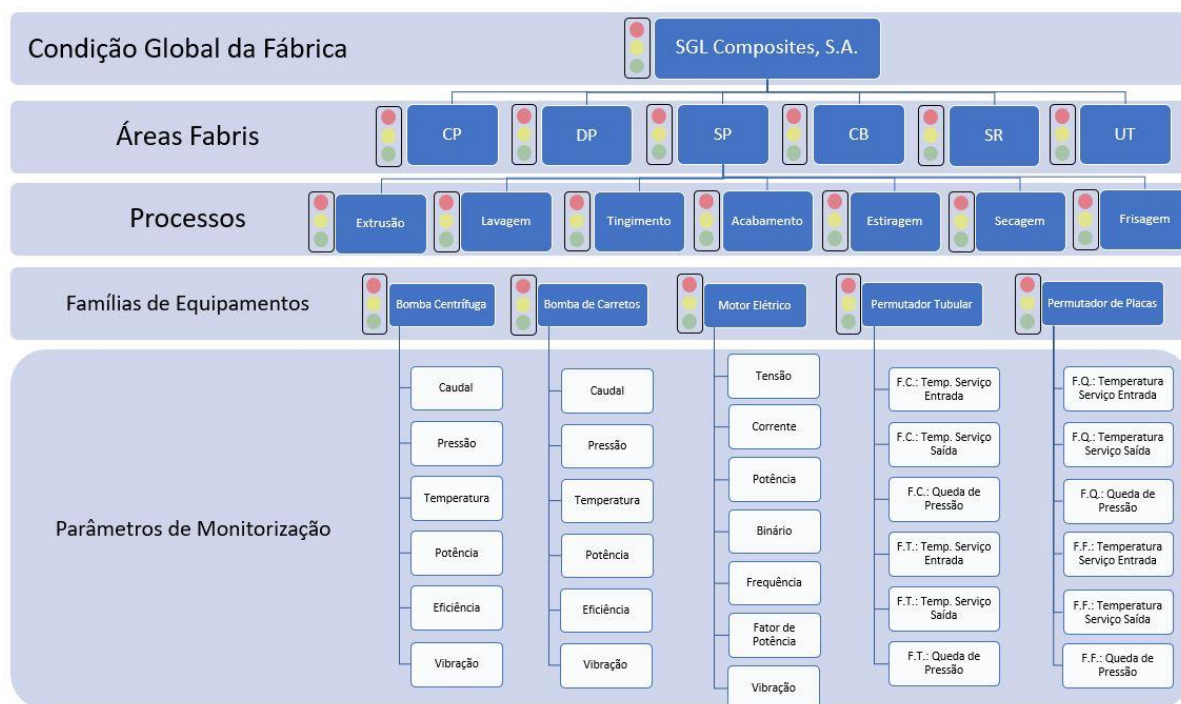


Figura 10 - Sugestão de *layout* para dispor a informação através de um *software* de *dashboarding*

A título exemplificativo, na Figura 11 apresenta-se o *layout* em *dashboarding* da informação relativamente a uma bomba centrífuga, onde se encontra os parâmetros que estão a ser monitorizados.

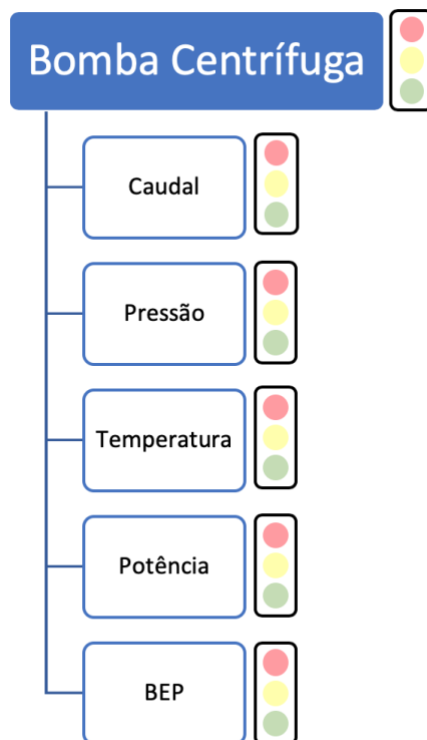


Figura 11 - *Dashboard* de uma bomba centrífuga

Recorre-se à representação tipo semáforo para indicar a condição atual do equipamento e, no caso de haver algum parâmetro que esteja a atingir algum nível limite ou tenha alguma tendência pronunciada no sentido da degradação, indicando uma possível avaria no futuro, é destacado no *dashboard* o parâmetro a ter em atenção. A luz verde indica que está tudo em bom funcionamento, dentro dos parâmetros esperados, a luz amarela indica a necessidade de intervenção futuramente, mas ainda com possibilidade de agendamento sem comprometer a produção e a luz vermelha indica a urgência de uma intervenção imediata para evitar falhas catastróficas.

5 Famílias de Equipamentos e Parâmetros de Monitorização

Como foi descrito no Capítulo 3, o processo produtivo da SGL Composites, S.A. envolve inúmeros equipamentos, sendo um desafio para o Departamento da Manutenção. Posto isto, uma das necessidades no Departamento de Manutenção da SGL Composites, S.A. é a determinação da condição global dos equipamentos através da monitorização dos mesmos. Como tal, foi proposto determinar os parâmetros de funcionamento que serão alvo de monitorização para que seja possível determinar a condição global dos mesmos.

Os equipamentos selecionados para este estudo são os que se encontram na área de *Spinning*. Escolheu-se esta área por ser uma área imprescindível para o processo de produção das diversas fibras e cada máquina é capaz de produzir variados tipos de fibras com diversos parâmetros de produção.

Este estudo tem como objetivo dar os primeiros passos no sentido da digitalização da informação da manutenção, para que, futuramente adote metodologias que permitam determinar o estado global de cada equipamento através da monitorização dos parâmetros de funcionamento para que, através da análise dos mesmos, seja possível obter informações acerca da sua condição global, prevendo possíveis avarias.

A seleção das famílias de equipamentos foi feita tendo como base o trabalho desenvolvido na fábrica recentemente, onde foi efetuado o estudo da predominância de anomalias dos equipamentos da área de *Spinning*. Neste estudo efetuou-se uma consulta ao *software* SAP para retirar a lista de equipamentos da área, tendo sido filtrada devido à existência de equipamentos obsoletos e, por fim, foram identificados os componentes de

cada equipamento e conseqüentemente os tipos de falhas dos mesmos [13]. Posto isto, as famílias de equipamentos que são alvo de estudo são: bombas centrífugas, bombas de carretos, motores elétricos, permutadores tubulares e permutadores de placas.

Nas secções que se seguem são apresentadas as características fundamentais das referidas famílias de equipamentos do ponto de vista construtivo e do seu funcionamento com o intuito de definir os parâmetros a monitorizar.

5.1 Bomba Centrífuga

5.1.1 Introdução

As bombas centrífugas são equipamentos utilizados na transferência de fluídos, transportando-os de um ponto para outro. Este transporte é efetuado através da conversão da energia cinética de rotação das pás em energia de pressão do fluído [24].

As bombas centrífugas pertencem à família das turbomáquinas. Define-se turbomáquina como um dispositivo que troca energia mecânica, sob a forma de trabalho ao veio, ao contatar com um fluído em deslocamento [25].

As principais características que se procuram numa bomba centrífuga são: resistência estrutural para os esforços a que é sujeita, facilidade de operação na instalação, operação e de ações de manutenção e, por fim, alto rendimento, havendo o mínimo de perdas possíveis durante o seu funcionamento [24].

5.1.2 Constituição

As bombas centrífugas são constituídas por três grupos de componentes: Componentes Estacionários, Componentes Rotativos e Componentes Auxiliares [24]. Na figura 12 temos representados os componentes gerais de uma bomba centrífuga:

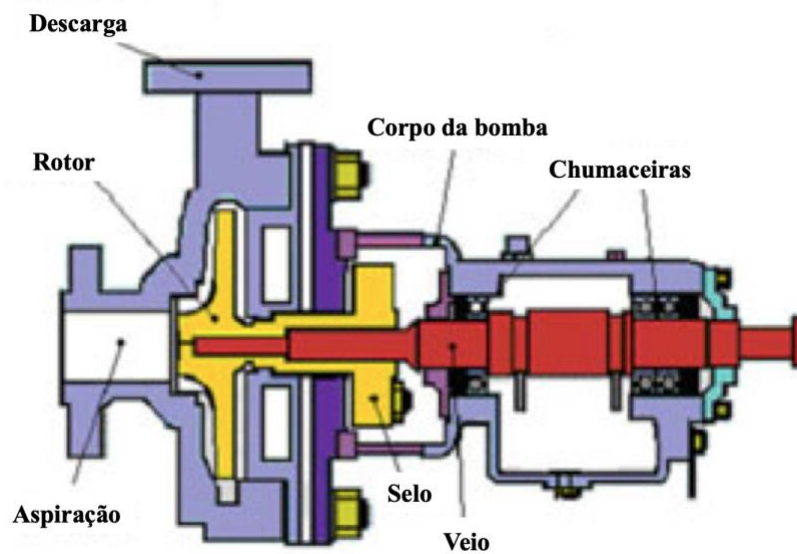


Figura 12 - Componentes gerais de uma bomba centrífuga, adaptado de [24]

Componentes Estacionários: Corpo da Bomba (Carcaça)

O corpo da bomba envolve o rotor, apresenta aberturas para a entrada do líquido (aspiração da bomba), bocal de aspiração, e para a saída do mesmo (descarga da bomba), bocal de descarga. Fundido ao corpo ou a este preso mecanicamente tem a câmara de vedação e a caixa das chumaceiras. Tem ligações para as tubagens do líquido de refrigeração e o líquido de selagem. Possui também os sistemas auxiliares.

Componentes Rotativos:

Rotor

É a parte giratória principal da bomba, fornecendo a aceleração centrífuga ao fluído.

A classificação do rotor é baseada na direção principal do fluxo em relação ao eixo de rotação: fluxo radial, axial ou misto; no tipo de aspiração: simples ou dupla; e na construção mecânica: fechado, aberto ou semiaberto.

Veio

Tem como objetivo transmitir a potência do motor elétrico ao rotor durante o seu funcionamento, apoiando o rotor e outras partes giratórias.

Componentes Auxiliares

Os componentes auxiliares dependem do tipo de bomba e da instalação em que esta se insere. De um modo geral, os sistemas auxiliares podem ser: tubagens, válvulas de isolamento, válvulas de controlo, válvulas de alívio, medidores de temperatura, medidores de pressão, indicadores de caudal, orifícios, refrigeradores do empanque, reservatórios de fluído do dique/defletor de empanque, e todas as aberturas e drenos relacionados.

5.1.3 Princípio de Funcionamento

A transferência de energia entre o fluído e a máquina ocorre ao nível do seu componente rotativo, o rotor. O rotor é o elemento móvel da turbomáquina e tem a ele associado um conjunto de pás, em relação às quais o fluído apresenta movimento relativo. A transferência energética, referida anteriormente, regista-se entre as pás e o fluído [24].

“O fluido entra axialmente na máquina, rodando então de 90° para ser admitido nas pás do impulsor, que lhe comunicam movimento de rotação. À saída do impulsor é obrigado a passar pela voluta, no interior da qual descreve uma trajetória em espiral. A voluta tem seção reta gradualmente crescente no sentido do escoamento, pelo que a energia cinética, ganha pelo fluído no impulsor, e aí parcialmente convertida em pressão estática” [25].

5.1.4 Parâmetros de desempenho de bombas centrífugas

No que diz respeito aos parâmetros de desempenho de uma bomba centrífuga, permitindo saber o estado atual de funcionamento, apresentam-se os seguintes:

Caudal

O caudal de um escoamento pode ser volúmico ou mássico e quantifica, respetivamente, o volume de fluído ou a massa de fluído que atravessam uma dada superfície de secção transversal por unidade de tempo.

O caudal depende de vários fatores, tais como as características do fluído (massa volúmica, viscosidade, temperatura e pressão) e as características da bomba (seções de entrada e de saída, rotor).

Portanto, na bomba é importante monitorizar o caudal à entrada da bomba e o caudal à saída.

Pressão

Define-se pressão como a força normal, exercida por unidade de área, que corresponde à taxa de variação cumulativa da quantidade de movimento do fluido que colidem com a superfície num determinado momento.

Neste sentido, é importante monitorizar a pressão à saída e a pressão à entrada da bomba.

NPSH

É a energia medida em pressão absoluta disponível na entrada de aspiração de uma bomba. Este parâmetro mostra a diferença entre a pressão de um líquido e a pressão de vapor do mesmo.

É a diferença entre o valor da pressão total – expressa em valor absoluto – e o valor absoluto da pressão de vapor do líquido. Traduzida em altura de carga, esta diferença poderá ser designada por margem de carga na aspiração.

Torna-se agora importante fazer a distinção entre o NPSH disponível, NPSHd, e o NPSH requerido, NPSHr:

- **NPSHd** é definido pela instalação em que a bomba opera; é a pressão de aspiração apresentada na entrada da bomba, é a energia que o sistema disponibiliza ou chega ao bocal de aspiração da bomba.
- **NPSHr** é definido pelo fabricante da bomba e representa a energia mínima que deve existir entre a carga de sucção e a pressão de vapor do líquido para que a bomba possa operar satisfatoriamente.

Para o correto funcionamento da bomba, deve-se manter o NPSHd superior ao NPSHr, uma vez que o NPSHr é o valor mínimo que a bomba irá operar sem que ocorra a cavitação, fenómeno descrito mais à frente.

Temperatura

A temperatura é, também, um dos parâmetros de desempenho a monitorizar uma vez que variações elevadas de temperatura podem pôr em causa o funcionamento da bomba. Após a análise aos tipos de falhas registados, os fenómenos que levam à variação da temperatura têm diversas origens, portanto a monitorização da temperatura é efetuada em diversas áreas e componentes da bomba. De seguida estão enumeradas as temperaturas que devem ser monitorizadas:

- **Temperatura do fluido do processo** – a escolha da bomba foi feita tendo em conta o fluido a transportar. E no caso de mudança de temperatura do fluido, as características do mesmo podem variar, alterando os parâmetros de funcionamento da bomba, podendo causar diversos problemas.
- **Temperatura do fluido de lubrificação** – o fluido de lubrificação têm como função a redução do atrito entre os componentes que têm movimento relativo aumentando a eficiência da bomba. A escolha do fluido de lubrificação é feita tendo em conta o intervalo de temperaturas no qual irá operar. No caso de estar fora deste intervalo pode ser um indicador de defeitos no funcionamento do equipamento, podendo causar falhas catastróficas futuramente
- **Temperatura de componentes da bomba** – embora os componentes da bomba onde a temperatura será monitorizada possuem fluido de lubrificação, a monitorização deste não é suficiente porque a sua monitorização é feita no depósito do fluido, e não localmente, não permitindo determinar a origem da variação da temperatura do fluido de lubrificação. No entanto, através da monitorização da temperatura de alguns componentes da bomba, o diagnóstico é mais fidedigno. Os componentes onde a temperatura será monitorizada serão, maioritariamente, os que possuem movimento relativo, tais como chumaceiras, rolamentos e retentores, de acordo com a informação presente na tabela 1.

Potência e Eficiência

Na monitorização da potência de uma bomba centrífuga é necessário ter em atenção a sua origem e o seu destino, uma vez que a potência fornecida a uma bomba centrífuga tem origem num motor elétrico, através de um veio, e acaba por ser entregue ao fluido. De seguida estão enumeradas as potências que serão monitorizadas:

- **Potência ao veio** – é a potência real entregue pelo motor elétrico ao eixo da bomba.
- **Potência de produção da bomba** – é a potência real entregue pela bomba ao fluido.

Durante todo este processo de transferência de potência houve perdas mecânicas e hidráulicas que foram compensadas pelo motor elétrico, portanto a potência ao veio é superior à potência de produção da bomba.

Posto isto, a eficiência da bomba é calculada tendo em conta os valores da potência e como parâmetro de desempenho a monitorizar tem-se o **BEP – Ponto de Melhor Eficiência (*Best Efficiency Point*)**.

BEP – Ponto de Melhor Eficiência (Best Efficiency Point).

O BEP é o ponto da curva da bomba onde esta opera com eficiência máxima, traduzindo-se na capacidade, com o rotor de diâmetro máximo, na qual a eficiência é máxima. Qualquer ponto à direita ou à esquerda do BEP tem eficiência mais baixa.

No momento de seleção de uma bomba centrífuga para uma determinada aplicação, a eficiência da bomba é tida em consideração de acordo com a instalação do projeto. A eficiência de uma bomba centrífuga é uma percentagem que descreve a conversão de uma força centrífuga em energia de pressão [26].

Quando a eficiência de uma bomba centrífuga está fora do intervalo dos 80-110%, o equipamento começa a manifestar diversos fenómenos, tais como, vibração, aumento de temperatura, erosão, cavitação, que podem levar a uma falha imprevista do equipamento. Por esta razão, o BEP é um dos parâmetros de desempenho da bomba centrífuga que deve ser monitorizado.

5.1.5 Falhas mais comuns

Um dos fenómenos mais problemáticos e comuns nas bombas centrífugas é a cavitação. Esse fenómeno ocorre quando a pressão de aspiração da bomba diminui, igualando a pressão de vaporização do fluído, por outras palavras, quando $NPSH_d < NPSH_r$, vaporizando o fluído, criando bolhas de vapor que implodem. Este fenómeno é manifestado através de níveis de vibração elevados do equipamento, ruído, temperaturas elevadas e através de uma queda progressiva da eficiência da bomba. Quando se efetua o Controlo da Condição através da Análise de Vibrações, o fenómeno de cavitação é diagnosticado quando se verifica a existência, no espetro de frequência, de valores de amplitude com uma distribuição do tipo uniforme numa banda de frequência acima de 1x rpm. Normalmente, este fenómeno pode ocorrer devido a velocidades excessivas de escoamento, altura inadequada de carga ou alterações das características do fluído do processo.

São diversas as falhas que se podem enumerar nos diversos componentes das bombas centrífugas, tal como se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de falhas por componente da bomba centrífuga [13]

| Componente | Falha |
|-----------------------|--|
| Corpo | Partido; Com furo |
| Rotor | Redução de diâmetro; Corrosão |
| Difusor/Voluta | Corrosão; Indentações/Ranhuras. |
| Empanque | Falta de vedação. |
| Chumaceiras | Falta de lubrificação. |
| Rolamentos | Gripados. |
| Veios | Fratura; Empeno; Desgaste na zona de serviço do retentor e do rolamento. |
| Retentores | Falta de pré-lubrificação; Degradação devido à temperatura. |
| Acoplamento | Desalinhamento; Vibração; Desgaste dos elementos flexíveis. |

5.2 Motor Elétrico

5.2.1 Introdução

Um motor elétrico é um componente eletromecânico que converte energia elétrica em energia mecânica.

Os motores elétricos são responsáveis por 70% do consumo elétrico na indústria e possuem diversas aplicações, tais como a rotação de bombas e ventiladores, compressores e elevação de diversos equipamentos.

É dos motores mais utilizados na indústria pelos seguintes fatores: baixo custo, construção simples e robusta, facilidade de montagem e de manutenção e é capaz de suportar cargas elevadas.

Existem dois tipos de motores elétricos: motores de Corrente Alternada (CA) e motores de Corrente Contínua (CC), tal como se verifica no esquema da Figura 13.

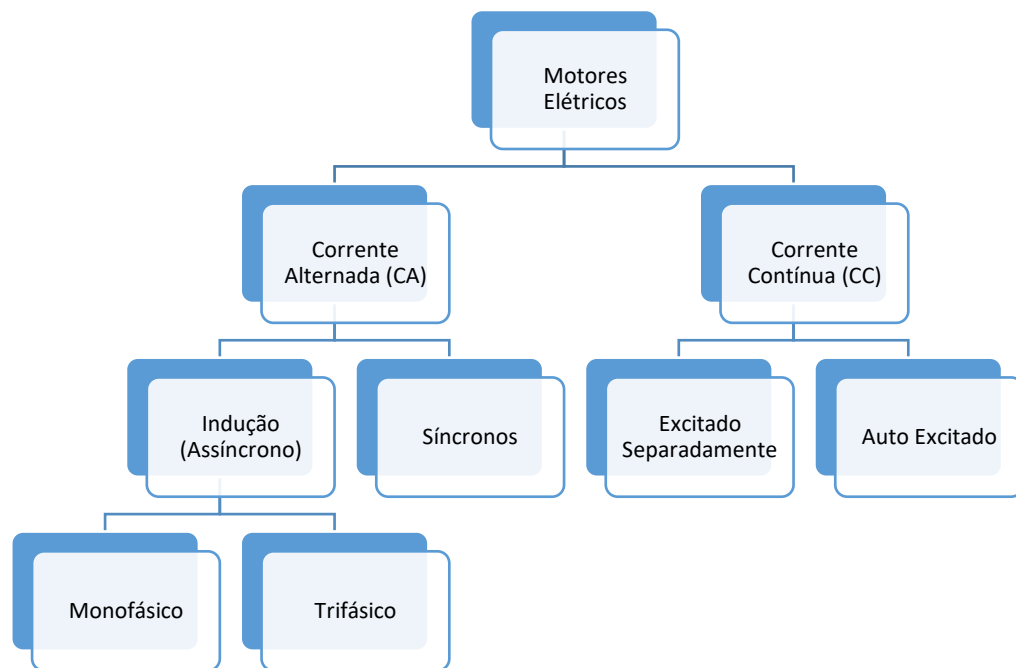


Figura 13 - Tipos de Motores Elétricos

O foco deste trabalho será nos motores de indução trifásicos, pois são os motores que existem em maior quantidade na empresa.

5.2.2 Constituição

A Figura 14 mostra a constituição de um motor de indução trifásico.

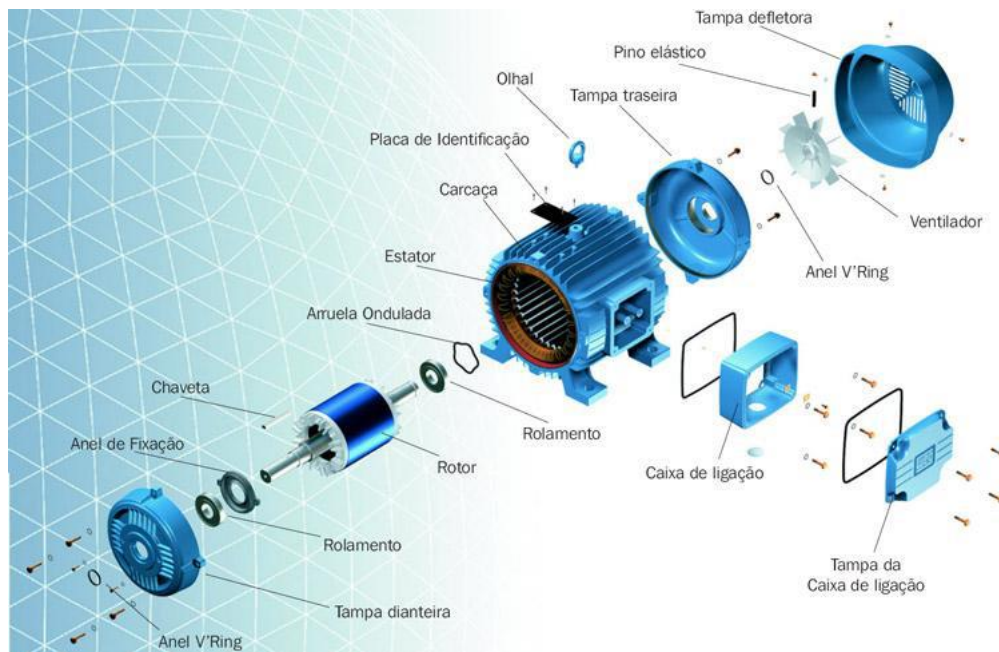


Figura 14 - Constituição do motor de indução trifásico, adaptado de [18]

Os vários componentes do motor são ligados através da carcaça, onde está alojado o estator e a caixa de terminais dos finais dos enrolamentos. No entanto será feita uma breve descrição de alguns componentes do motor, que são o estator, o rotor e os enrolamentos.

O estator é constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si. Estas têm ranhuras onde estão os enrolamentos e são alimentados pela corrente trifásica.

Os enrolamentos que constituem o estator encontram-se espaçados à mesma distância, criando assim um campo girante.

Por fim, o rotor é a parte móvel da máquina apoiada à carcaça através dos rolamentos. O fenómeno de indução ocorre no entreferro, que é o espaçamento entre o rotor e o estator.

5.2.3 Princípio de Funcionamento

Nos enrolamentos do estator aplica-se tensão alternada que vai criar um campo magnético variante no tempo, gerando um campo girante na velocidade proporcional à frequência da rede elétrica. O fluxo magnético girante no estator atravessa o entreferro induzindo tensão alternada nos enrolamentos trifásicos do rotor. Como estes estão curto-circuitados, esta tensão induzida promove a circulação de corrente nos enrolamentos do

rotor, produzindo um fluxo magnético no mesmo, que irá tentar alinhar com o campo magnético girante do estator produzindo, assim, o movimento de rotação do rotor [27].

5.2.4 Parâmetros de desempenho de motores elétricos

Para que se entenda a seleção dos parâmetros de desempenho a monitorizar nos motores de indução, é importante fazer uma breve introdução aos conceitos de circuitos elétricos, visto que um motor elétrico não é mais do que um circuito elétrico.

Tensão e Corrente

A tensão é fixa e a corrente varia consoante as necessidades do motor. Estes parâmetros têm resposta imediata, estando em concordância com o desempenho do motor. Por exemplo, no momento de arranque de um motor, a potência necessária é maior para vencer o atrito estático existente no sistema, logo, a corrente elétrica é superior neste momento e vai diminuindo até que o motor se aproxime da sua velocidade nominal. Também, durante o funcionamento do motor, o consumo de corrente elétrica varia de acordo com a carga [18].

Potência

A potência é um parâmetro de desempenho a monitorizar pois permite efetuar o cálculo para determinar o rendimento do motor, uma vez que existem perdas de diversos tipos. O rendimento é o quociente entre a potência útil e a potência elétrica. Portanto, sendo a potência elétrica a potência ativa absorvida através da rede pelo estator, existem diversos tipos de perdas até se obter a potência útil, potência debitada pelo motor ao sistema. Os diversos tipos de perdas existentes são: perdas óhmicas, ou por efeito de Joule, nos enrolamentos de cobre do estator e do rotor; perdas magnéticas no ferro; e perdas mecânicas devido ao atrito e à ventilação [28].

Binário

O binário necessário para manter uma velocidade de rotação corresponde a pôr em jogo um rendimento, sendo proporcional à potência interna do motor [28].

Frequência

A frequência é, também, um dos parâmetros de desempenho a monitorizar uma vez que a velocidade do motor é controlada através de um dispositivo de controlo: um

variador de frequência. Este dispositivo gera os sinais necessários a partir da leitura dos diversos parâmetros de funcionamento para que seja possível controlar a velocidade do equipamento [28].

Fator de Potência

Por fim, o fator de potência é um parâmetro de desempenho a monitorizar porque é um indicador da eficiência da utilização da energia e tem limites que necessitam de ser respeitados de acordo com a legislação para a indústria em questão, e país [29].

5.2.5 Falhas mais comuns

Os tipos de avarias mais comuns que ocorrem nos motores elétricos, neste caso, motores de indução, podem ser classificadas em falhas elétricas e falhas mecânicas.

De um modo sintético, aqui ficam alguns exemplos de cada um dos tipos de falhas:

1. Falhas elétricas:
 - Curto circuitos, como consequência de falhas no isolamento elétrico;
 - Ligações erradas entre enrolamentos;
 - Resistência elevada no contato entre condutores de bobinas da mesma fase;
 - Problemas na ligação à terra.
2. Falhas Mecânicas
 - Falhas nos rolamentos;
 - Barras rotóricas partidas;
 - Desalinhamento;
 - Danos no veio.

Estas são apenas algumas das avarias mais comuns que podem ocorrer durante o funcionamento de um motor de indução [30].

5.3 Bomba de Carretos

5.3.1 Introdução

As bombas de carretos, também chamadas de bombas de engrenagens, são bombas de deslocamento positivo. As bombas de deslocamento positivo são todas as bombas que

deslocam um volume de fluido fixo após um ciclo do seu mecanismo de compressão, independentemente da pressão de saída [31].

É um dos componentes de um sistema hidráulico, responsável por bombear o fluido para o sistema.

Este tipo de bomba é indicado para a transferência de fluidos com características que podem causar dificuldades no bombeamento, tais como a abrasividade e a viscosidade [32].

As bombas de carretos, tal como o próprio nome indica, possuem um par de carretos. Um dos carretos é acionado através de um motor elétrico e o segundo carreto é acionado através do movimento do primeiro.

5.3.2 Constituição

As bombas de carretos são constituídas pelo corpo da bomba, veios, carretos, tampas, casquilhos, acoplamento, empanque convencional ou mecânico.

5.3.3 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de uma bomba de carretos pode ser dividido em três fases: a aspiração, o transporte e a expulsão do fluido.

A aspiração é promovida pelo movimento dos carretos criando vácuo, preenchendo a cavidade entre os dentes dos carretos e o corpo da bomba. O transporte do fluido até à área de descarga é assegurado pelo movimento de rotação dos carretos e a vedação é assegurada pelos dentes dos carretos e pelo corpo da bomba. Por fim, a expulsão do fluido dá-se quando os dentes dos carretos reiniciam o contato.

5.3.4 Parâmetros de desempenho de bombas de carretos

Tais como as bombas centrífugas, os parâmetros de desempenho das bombas de carretos são os mesmos.

5.3.5 Falhas mais comuns

Tal como as bombas centrífugas, a cavitação é uma das falhas mais comuns e são diversas as falhas que se podem enumerar nos diversos componentes das bombas de carretos, tal como se pode observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de falhas por componente da bomba de carretos [13]

| Componente | Falha |
|--|--|
| Veios | Fratura; Empeno; Desgaste na zona de serviço do retentor e do rolamento. |
| Carretos | Dentes arrasados; Desgaste. |
| Tampas | Fuga pela junta. |
| Empanque convencional ou mecânico | Perda de elasticidade; Estalar mecânico. |
| Casquilhos | Desgaste nos casquilhos de apoio à bomba. |
| Acoplamento | Desalinhamento; Vibração; Desgaste. |
| Corpo | Perda de espessura. |

5.4 Permutador de Calor

5.4.1 Introdução

Nesta secção serão analisados dois tipos de permutadores de calor: o permutador de placas e o permutador tubular. De referir que o princípio de funcionamento de ambos difere apenas no fluxo, visto que têm geometrias diferentes.

Um permutador de calor é um dispositivo utilizado para o processo de transferência de calor entre dois fluídos a temperaturas diferentes, a uma determinada pressão.

De modo a que haja troca de calor da maneira mais eficiente, os permutadores de calor são projetados tendo em conta as diferenças de temperatura para as quais irá

funcionar; tem-se em atenção os materiais utilizados, procurando um coeficiente de condutividade térmica elevado; a geometria, procurando aumentar a área de contato entre os fluídos; e o fluxo percorrido pelos fluídos.

5.4.2 Constituição

Permutador Tubular

O permutador tubular é constituído por um feixe de tubos envolvidos por um casco, normalmente cilíndrico, e um dos fluídos circula externamente ao feixe de tubos e o outro circula no interior dos tubos. A transferência de calor dá-se entre o fluído que passa nos feixes tubulares e o fluído que circula no interior do tubo [33].

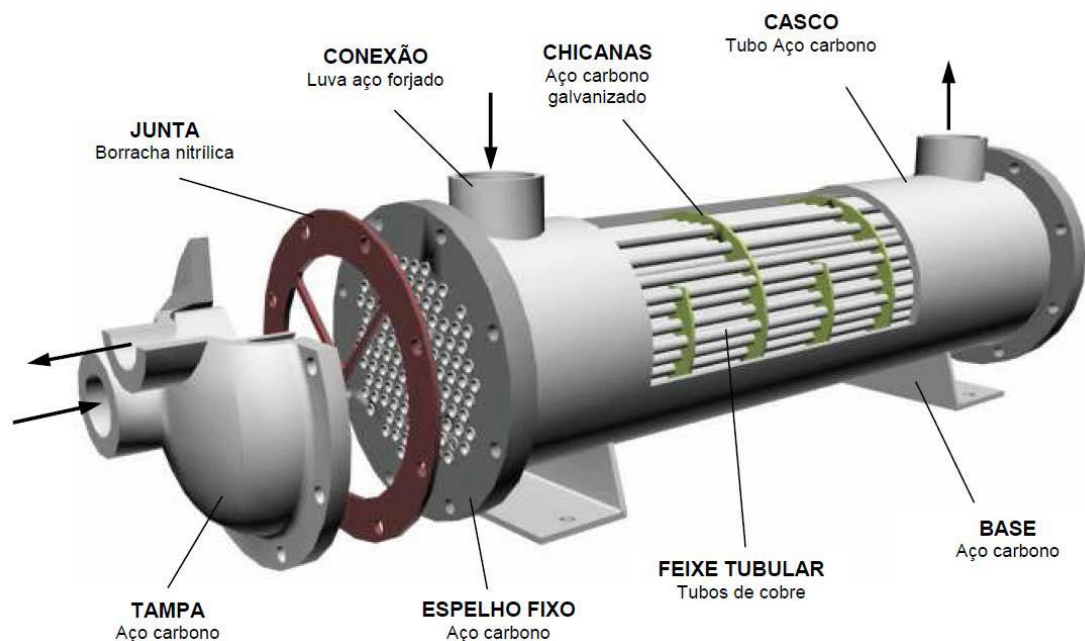


Figura 15 - Constituição de um Permutador Tubular, adaptado de [33]

Permutador de Placas

O permutador de placas é composto por uma estrutura de suporte e um conjunto de placas de transferência de calor. As placas encontram-se suspensas no tirante superior e comprimidas entre as placas de aperto fixo (primeira e última placa de encosto) e as placas de aperto móvel (placas do circuito de aquecimento e placas do circuito de arrefecimento). Cada placa possui juntas de vedação no contorno exterior para formar câmaras estreitas e vedar a passagem dos fluídos. O fluído circula pelas câmaras referidas anteriormente, cedendo ou recebendo calor do fluído que passa nas faces opostas da mesma placa. De

um modo geral, um permutador de placas é composto por conjuntos de placas [34], tal como se verifica na Figura 16.

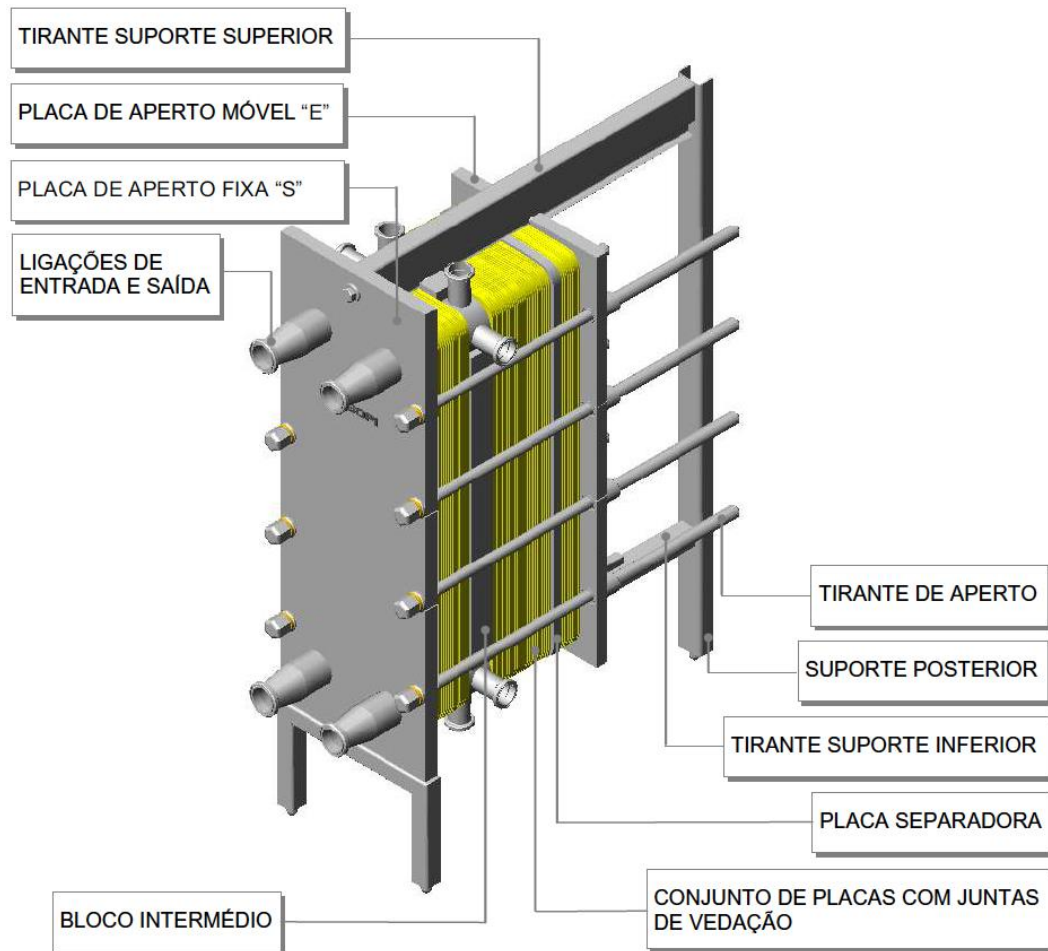


Figura 16 - Constituição de um Permutador de Placas, adaptado de [34]

5.4.3 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de permutadores de calor é a transferência de calor entre dois fluídos a temperaturas diferentes, a uma determinada pressão. A título exemplificativo, a função do permutador de calor é aquecer um fluído usando energia proveniente de outro fluído mais quente, ou o contrário dependendo da aplicação. Em termos técnicos, o permutador serve para aumentar a energia de um fluído à custa da diminuição da energia de outro fluído [35].

5.4.4 Parâmetros de desempenho de permutadores de calor

Visto que o princípio de funcionamento dos permutadores de calor é o mesmo, os parâmetros de desempenho dos permutadores de calor são os mesmos, alterando apenas a nomenclatura de acordo com o tipo de permutador.

Então, os parâmetros a monitorizar são a temperatura de entrada e de saída dos fluídos que efetuam a troca de calor nos permutadores e a diferença de pressão dos mesmos. Nos permutadores tubulares circula o fluído do corpo (F.C.) e do fluído do tubo (F.T.) e nos permutadores de placas circula o fluído quente (F.Q.) e o fluído frio (F.F.). De seguida está a designação dos parâmetros de monitorização para cada um dos permutadores.

Permutador Tubular

Desta forma, os parâmetros de desempenho para os permutadores tubulares são:

- F.C.: Temperatura de serviço à Entrada;
- F.C.: Temperatura de serviço à Saída;
- F.C.: Queda de pressão;
- F.T.: Temperatura de serviço à Entrada;
- F.T.: Temperatura de serviço à Saída;
- F.T.: Queda de pressão.

Permutador de Placas

Para os permutadores de placas, os parâmetros de desempenho são os mesmos, com a alteração na nomenclatura, como referido anteriormente.

- F.Q.: Temperatura de serviço à Entrada;
- F.Q.: Temperatura de serviço à Saída;
- F.Q.: Queda de pressão;
- F.F.: Temperatura de serviço à Entrada;
- F.F.: Temperatura de serviço à Saída;
- F.F.: Queda de pressão.

5.4.5 Falhas mais comuns

São diversas as falhas que se podem enumerar nos diversos componentes dos permutadores, tal como se pode observar nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Tipos de falhas por componente do permutador tubular [13].

| Componentes | Falhas |
|------------------------------|--|
| Tubos internos | Eclosão (devido à diminuição de espessura por ataque químico pelo fluído passante); Rotura. |
| Corpo (tubo exterior) | Falha devido ao ataque químico; Corrosão. |
| Espelhos | Ataque Químico; Corrosão. |
| Tampas | Perda pela junta. |
| Defletores | Ataque químico. |

Tabela 4 - Tipos de falhas por componente do permutador de placas [13].

| Componentes | Falhas |
|--|---|
| Placas do circuito de aquecimento | Dobra na montagem. |
| Placas no circuito de arrefecimento | Dobra na montagem. |
| Juntas | Desgaste; Excesso de pressão no circuito, levando ao colapso da junta; Má montagem. |
| Placas de encosto | Desgaste ao fim de algum tempo devido à corrosão dependente do tipo de material (ataque químico). |
| Flanges de ligação | Corrosão e fuga pela junta. |

6 Conclusão

A presente dissertação tem como objetivo dar início à digitalização da informação da manutenção na SGL Composites S.A. para que seja possível determinar e avaliar o estado de condição global da mesma à luz do conceito BIM, no âmbito do paradigma da indústria 4.0. Esta dissertação foi desenvolvida em parceria com uma unidade da SGL Composites, S.A. e teve um período de permanência de cinco meses no complexo industrial.

Numa fase inicial do desenvolvimento do trabalho, com permanência na fábrica, houve um período de adaptação de modo a conhecer a fábrica, os processos de fabrico e os respetivos equipamentos, a organização, a distribuição de atividades pelos respetivos setores, assim como as pessoas envolvidas. Este período de permanência ocorreu no Departamento de Manutenção. As atividades desenvolvidas foram, maioritariamente, de levantamento bibliográfico e de partilha de conhecimentos de modo a entender o funcionamento dos equipamentos que foram alvo de estudo. No decorrer desta fase inicial, chegou-se rapidamente à conclusão de que o objetivo inicial desta dissertação, que seria a criação de uma classe ou classes de ficheiros IFC para equipamentos industriais não seria útil no imediato. Neste sentido, procedeu-se ao entendimento da filosofia BIM e como é que seria aplicada na fábrica. Com isto chegou-se à conclusão de que o caminho a seguir seria o levantamento da informação e dos procedimentos necessários para estabelecer a base de uma manutenção integrada. Os primeiros passos nesse sentido foram dados, essencialmente através de um estudo do funcionamento de diversas famílias de equipamentos e dos parâmetros a monitorizar, com o intuito de avaliar em tempo real o estado de condição global da fábrica.

Para isto, após uma revisão das potencialidades da implementação de novas metodologias na manutenção industrial no âmbito da Indústria 4.0, onde se efetuou um resumo da contribuição das inovações para a gestão da manutenção e a descrição da arquitetura de um sistema ciberfísico para sistemas de produção, baseados na Indústria 4.0, procedeu-se à estruturação do fluxo da informação da fábrica, desde os dados provenientes do controlo da condição dos equipamentos, até à determinação do estado de funcionamento de cada equipamento, de cada processo, de cada área fabril, determinando, finalmente, o estado de condição global da fábrica. Por fim, com a aplicação da arquitetura de sistemas ciberfísicos foi possível projetar o *layout* de um *software* de *dashboarding* que a fábrica poderá usufruir no futuro, onde está presente o estado atual de cada família de equipamento, de cada processo, de cada área fabril. Como o que nos permite determinar esta condição global é a análise dos parâmetros de funcionamento das famílias de equipamentos que assegura cada processo produtivo de cada área fabril, procedeu-se ao estudo de diversas famílias de equipamentos, onde se apresentam as características fundamentais das referidas famílias de equipamentos do ponto de vista construtivo e do seu funcionamento com o intuito de definir os parâmetros a monitorizar.

Esta dissertação contribui para que a SGL Composites, S.A. passe a estar munida de informação que, no futuro, lhe permitirá implementar metodologias para efetuar a análise da condição através da monitorização contínua dos equipamentos.

Tendo em conta que esta dissertação está numa fase muito inicial daquele que é o potencial da digitalização da informação na manutenção industrial, no âmbito da Indústria 4.0, havendo muito por evoluir, aqui ficam algumas propostas de trabalhos futuros:

- Análise da condição de um equipamento em tempo real, definição dos limites de funcionamento e disposição da informação num sistema de análise e visualização da informação.
- Hierarquização da informação para aferir acerca da condição global da fábrica, tendo em conta a definição da criticidade de parâmetros de monitorização no sentido de detetar falhas predominantes com impacto considerável na produção.
- Desenvolvimento de uma classe ou classes de ficheiros IFC para equipamentos industriais com o intuito de apresentar e partilhar a informação em ambiente de visualização 3D ou mesmo de realidade virtual.
- Realização de um estudo quanto aos *softwares* disponíveis no grupo e otimização da utilização destes, contribuindo para as boas práticas de Gestão de Manutenção.

- Levantamento dos *softwares* existentes na SGL Composites S.A. e estruturação de uma arquitetura de sistemas para que toda a informação gerida pelos diversos *softwares* se concentre numa base de dados integrada para determinar a condição global da fábrica.

Referências

- [1] Venâncio, Maria; “Avaliação da Implementação de BIM - *Building Information Modelling* em Portugal” Julho 2015 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto).
- [2] Grilo, António; Tavares, L. Valadares (2008) *O Building Information Model e a Competitividade do Sector da Construção*, Lisboa: OPET – Observatório de Prospectiva da Engenharia e da Tecnologia.
- [3] <https://jornaleconomico.sapo.pt/noticias/nao-aprovar-industria-4-0-a-quarta-revolucao-industrial-182746>; Fev 2019.
- [4] <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:29481:-1:ed-2:v1:en>; Jan. 2020
- [5] Carmali, Sara; “Aplicação de BIM a Infraestruturas Ferroviárias. Controlo da qualidade na construção” Novembro 2018 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa)
- [6] <https://revittemplate.com.br/bim/bim-3d-ao-7d/>; Fev 2019.
- [7] Pinho, Fábio; “Norma BIM Portuguesa” Janeiro 2015 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra).
- [8] <https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/Revit-DocumentPresent/files/GUID-0D546BEA-6F88-4D4E-BDC1-26274C4E98AC-htm.html>; Agosto 2019.
- [9] NP EN 13306, Terminologia da Manutenção, 2007, IPQ, Caparica
- [10] Barbosa, Patrícia; “Monitorização do Estado de Condição de Equipamentos com Recurso a Cartas de Controlo Estatístico” Julho 2012 (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa).
- [11] Mobley, R. K., Higgins, L. R., Wikoff, D. J. (2008). "Maintenance engineering handbook". (7th ed.). USA: MacGraw-Hill.

[12] Viegas, Guilherme; “Levantamento, identificação e classificação de dados para a gestão da manutenção numa empresa industrial” Setembro 2014 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa).

[13] Oliveira, Ricardo; “Estudo da predominância de anomalias e proposta de sistema de monitorização aplicado a uma linha de produção de fibras têxteis” Setembro 2018 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa).

[14] Márquez, A. C., León, P. M., & Fernández, J. F. (2007) *The Maintenance management Framework: A practical view to maintenance management*. Journal of Quality in Maintenance Engineering.

[15] Filipe, Emanuel; “Gestão de Manutenção de uma Empresa Gráfica” Outubro 2014 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa).

[16] Almeida, Gonçalo; “Manutenção Preventiva: implementação de um caso prático” 2011 (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Universidade de Aveiro).

[17] Randall, Robert Bond (2011). “Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications”. John Wiley & Sons, Ltd.

[18] Amaral, Bruno; “Diagnóstico de avarias em motores elétricos” Fevereiro 2014 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa).

[19] Lampreia, Suzana; “Manutenção Baseada no Estado de Condição. Uma Abordagem Utilizando Cartas de Controlo Modificadas” Setembro 2013 (Tese de Doutoramento em Engenharia Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa).

[20] SGL Composites, S.A., Manual de Acolhimento, 2018.

[21] <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/acrylic-fibers/>;
Agosto 2019.

[22] https://maxinst.com.br/cinco-inovacoes-que-a-computacao-cognitiva-trouxe-para-a-gestao-de-manutencao-e-ativos/?utm_campaign=news_maxinst_1_agosto_2019&utm_medium=email&utm_source=RD+Station; Agosto 2019.

[23] Lee, J, Bagheri, B., & Kao, H. (2015) A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, Vol. 3, 18-23, 2015.

[24] dos Santos, Valdemir; “Manutenção industrial: Análise da fiabilidade de bombas centrífugas – um caso de estudo” Abril 2012 (Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa).

[25] Oliveira, Luis; Lopes, António (2012). “Mecânica dos Fluidos”. (4ª ed.).Lidel – Edições Técnicas, Lda. Lisboa.

[26] <https://web.archive.org/web/20070502235325/http://www.ufrnet.ufrn.br/~lair/Pagina-OPUNIT/bombascentrifugas-3.htm>; Agosto 2019.

[27] https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_indu%C3%A7%C3%A3o; Agosto 2019.

[28] Pereira, Pedro; “V – Máquina Assíncrona (Indução)” 2017/2018 (Slides das aulas de Eletrotécnica e Máquinas Elétricas, do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa).

[29] https://pt.wikipedia.org/wiki/Fator_de_pot%C3%A2ncia; Agosto 2019.

[30] Dinis, Pedro; “Análise e Monitorização de Condição em Motores de Indução Trifásicos” Fevereiro de 2017 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto).

[31] https://pt.wikipedia.org/wiki/Bomba_hidr%C3%A1ulica; Agosto 2019.

[32] <http://www.tetralon.com.br/bombas-de-engrenagem/>; Agosto 2019.

[33] Mello, Mário; “Trocadores de Calor” 2014 (Material Didático sobre Trocadores de Calor para o curso de Inspetor de Equipamento Cetepis, Cetepis Brasil, Colégio e Curso).

[34] Thermal, Arsopi; “Permutador de Calor de Placas. Manual de Instruções.” 2012 (Manual de Instruções de Permutadores de Calor de Placas elaborado pela Arsopi-Thermal).

[35] Oliveira, Paulo (2015) “Fundamentos de Termodinâmica Aplicada. Análise Energética e Exergética.” (2ª ed.).Lidel – edições técnicas, lda. Lisb

